大众物理学史

○ 刘树勇 白欣 周文臣 韦中燊 著

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国科学院自然科学史研究所 策划
丛书主编 郭书春





山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

责任编辑　王洪胜　魏海增
装帧设计　魏　然　李玉颖

读史使人明智，科学使人深刻。科学技术史既蕴含着科技知识，又充满了人的故事。《大众科学技术史丛书》由科技史专家撰写，面向大众读者；兼顾知识与方法，融汇科技与人文；再现发现发明，倡导求真务实；推动文明进步，助力民族复兴。

ISBN 978-7-5331-7664-8



定价：29.00元

大众物理学史



◎ 刘树勇　白欣　周文臣　韦中燊　著

"十二五"国家重点图书出版规划项目
中国科学院自然科学史研究所　策划
丛书主编　郭书春

山东科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大众物理学史/刘树勇,白欣,周文臣,韦中燊著.—济南:山东科学技术出版社,2015
(大众科学技术史丛书)
ISBN 978-7-5331-7664-8

Ⅰ.①大… Ⅱ.①刘…②白…③周…④韦… Ⅲ.①物理学史—世界—普及读物 Ⅳ.①04-091

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第292387号

大众科学技术史丛书
大众物理学史
刘树勇　白　欣　周文臣　韦中燊　著

主管单位:山东出版传媒股份有限公司
出 版 者:山东科学技术出版社
地址:济南市玉函路16号
邮编:250002　电话:(0531)82098088
网址:www.lkj.com.cn
电子邮件:sdkj@sdpress.com.cn
发 行 者:山东科学技术出版社
地址:济南市玉函路16号
邮编:250002　电话:(0531)82098071
印 刷 者:山东德州新华印务有限责任公司
地址:德州经济开发区晶华大道2306号
邮编:253074　电话:(0534)2671209

开本:720mm×1000mm　1/16
印张:16.5
版次:2015年8月第1版　2015年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5331-7664-8
定价:29.00元

《大众科学技术史丛书》
编 委 会

序 Foreword

英国哲学家培根说，读史使人明智，科学使人深刻。科学技术史图书可以给读者提供一举数得的精神食粮，而科学技术史的普及读物对社会的影响常常比专著还要大。了解科学技术进步的历史不仅有利于掌握知识，更有利于认识科技发展的规律，学会科学发现和技术发明的方法，提高国民特别是青少年学生的素质。因此，向读者提供高质量的科学技术史普及读物，是科学技术史学者和出版机构责无旁贷的使命。

为了充分利用科学技术史传播科学知识，弘扬科学精神，培养青少年学科学、爱科学的良好素质，学术界有必要撰写系统阐述科学技术不同学科发展历史的普及读物。为此，中国科学院自然科学史研究所与山东科学技术出版社商定合作撰写、出版一套《大众科学技术史丛书》。该课题得到有关部门的大力支持，并列入《"十二五"国家重点图书、音像、电子出版物出版规划》增补项目。

本丛书展现历史上的科学技术知识以及科学技术专家的生平、科学活动和科学思想，兼具科学性和人文性，反映科学技术发展与人文思想演进的关系。本丛书力求具有科学性、系统性和通俗可读性。

所谓科学性，就是科学准确地表述各学科史的内容，并尽可能汲取最新的研究成果。各册所述内容必须是学术界公认的，经得起时间考验的。对学术界尚有争论的内容，或者以一家为主，兼及别家，或者并列诸家之说。主要学术观点力求有原始文献或转引自权威著作的文献作依据，避免粗制滥造、以讹传讹。

所谓系统性，一方面，指在书目设置上既有基础学科，又有应用学科，覆盖数

学、物理学、化学化工、天文学、地学、生物学、医学、农学、建筑、机械技术、纺织技术、军事技术等科学技术史的各个主要分支学科；另一方面，指每一学科的篇章设置能够涵盖该学科的重要成就、著作和科学家、重大事件和科学技术机构等，要使读者能够比较完整地了解该学科由低到高的不同发展阶段及其在不同文化传统中的特点。

所谓通俗可读性，就是既要使用规范的汉语语言和标准汉字，又要做到通俗易懂，雅俗共赏，老少咸宜。在确保科学性的同时，要尽量采用便于大众理解的表述方式，并对历史上出现的、今天已经不再使用的重要术语用现代术语加以解释。

我们希望，广大读者特别是青少年学生通过本丛书既可以领略科学技术的严谨，又能理解它们对经济和社会发展的巨大作用，受到科学精神的熏陶，激发对科学技术的兴趣，树立钻研科学技术的志向。

本丛书各分册的作者都是科学技术史学科有较深造诣的专家，有的是学科的领军人物，有的是成绩突出的中青年骨干。当然，任何工作都是阶段性的，每位学者的知识都有局限性，即使是术有专攻的专家也不例外，因此本丛书也可能有明显的疏漏和错误之处，恳请读者们不吝赐教，以便再版时修正。

中国科学院自然科学史研究所所长、研究员

张柏春

前言

Preface

对于自己的学术源流和思想发展脉络，清代学者杨凯运有云：

吾道南来，原是濂溪一脉；

大江东去，无非湘水余波。

其中“濂溪”为潇水支流，位于湖南省宁远县境内，北宋思想家周敦颐在此悟道并创立理学，号“濂溪老人”，长沙岳麓书院至今设有濂溪祠专祀周敦颐。岳麓书院是我国古代理学的重要发源地，也是湘学的鼎定之所，清代乾隆皇帝御书匾额“道南正脉”。杨凯运性情孤傲，终生不仕，曾在岳麓书院讲学。他也曾受邀到江浙一带讲学，当地官员探问他的学问渊源，他以此联作答。在联中，杨凯运自称学问来自濂溪先生，而他的成就，即便有“大江东去”的气象，那也不过是湘水的余波而已，表现出极度谦虚的胸怀。

如果我们用杨凯运的话来描述现代物理学与过往思想的关系，是再恰当不过了。现代物理学的基本精神和追求同古代科学研究的传统是一脉相承的，这个传统就是要揭示出现象背后的本体或始基，即要找到构成万事万物的本原。

下面我们将要铺陈物理学发展的壮美画卷，把读者领进源远流长的物理学历史之中，去领会物理学的事件和物理学家的智慧。

在开始阅读之前，我们先看一下爱因斯坦的成才之路。

爱因斯坦小的时候并未显现出日后成为科学巨人的迹象，他甚至直到三四岁

才会说话，这让亲人对他的未来担忧。是什么力量使爱因斯坦后来成为伟大的物理学家呢？纵观爱因斯坦的一生，可以肯定的是，有三样东西起了重要的作用，那就是：兴趣，阅读，思考。

爱因斯坦对科学的兴趣源于他 5 岁时父亲送给他的生日礼物——罗盘，爱因斯坦对磁针的定向特征十分惊奇，而后来对科普读物的阅读又强化了他对自然科学的兴趣。

科普读物的优势在于，能够用简单明了的语言把一个很深奥的问题讲清楚，使一个年龄很小的孩子也能够弄明白一些道理（甚至于领会纷繁的科学思想）。在爱因斯坦 10 岁左右时，就已经阅读了好几本数学和物理方面的科普读物了。

自然，兴趣与阅读又引发了爱因斯坦对于未知问题的追问与思考。反过来，这样的思考又把他引向了更加广泛的阅读，形成了思考和阅读相互促发的良性循环。

可见，爱因斯坦的成长是一个范例，向我们传达了一个惊人的成功“秘诀”：对科普读物的阅读是通往智慧之门最便捷的通道！所以，我们希望，当读者阅读这本《大众物理学史》时能够对物理学产生兴趣，并引发思考，如此则书的编写目的就达到了。

本书第一篇由刘树勇撰写，第二篇由韦中燊撰写，第三篇由周文臣撰写，第四篇由白欣撰写，全书由刘树勇统稿。由于种种原因，书中难免有不当之处，诚挚地欢迎读者批评指正。

著　者

目录

Contents

第一篇　物理学的萌芽

第二篇 近代物理学

第三篇 现代物理学

第四篇　奠基中国近代物理学的大师们



第一篇 物理学的萌芽



历史学家按人类使用的工具来划分不同的历史时期，共有3个时期：石器时代、铜器时代和铁器时代。石器时代长达200万—300万年，而使用铜器和铁器的时代，加起来也不超过6 000年。在这最近的几千年间，物理学已经发展成自然科学一个庞大的和重要的分支。在回首物理学的发展历程之时，总要追溯它的发端。那时一些有名或无名的智者为此做出了重要的贡献，他们的不懈探索使物理学逐渐发展。

古代智者的见识

古希腊的自然哲学是自然科学知识与哲学思想相结合的产物。这种结合有利于自然科学理论体系的建立，逐渐发育成各种独立的学科，并且也有利于哲学思想的发展。希腊的自然哲学研究对后世科学与哲学的研究和发展产生了重要的影响。

古希腊的大科学家和大数学家阿基米德（公元前287—前212，图1-1）在数学和物理学的研究上颇有建树，他巧测金冠质量的故事已广为流传。

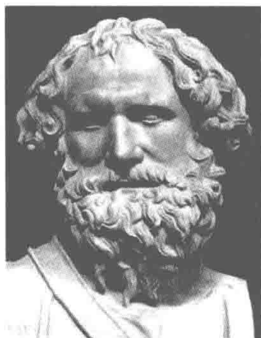


图1-1　阿基米德像

阿基米德对杠杆也很有研究，他找到了关于杠杆完整的数学关系：杠杆受到的力与其力臂成反比。他把对重量和距离的测量应用在对杠杆的研究中，并提出了重心的概念。阿基米德对杠杆研究得很透彻，还提出了一个大胆的假设："只要给我一个支点，我就能撬动地球！"据说，国王对此有疑问，问阿基米德是否有能力搬一个很重的物体？阿基米德用钩子钩住一组做成滑轮形式的杠杆，他自己则舒服地坐着，只用一只手就把满载的船只拉上岸。

阿基米德还计算了圆周率，他得到的值是在$\frac{223}{71}\sim\frac{220}{70}$之间。他的方法是计算圆内接和圆外切多边形的周长和直径，类似于后来的微积分。

据说，在与罗马交战时，阿基米德曾让人们用反光镜反射阳光引燃了罗马舰船。有人说，这差不多是罗马舰队与阿基米德个人的战争。

阿基米德在研究时是很投入的，常常废寝忘食，甚至忘记一切。罗马人攻陷城池时，阿基米德正在为研究一个几何问题而画图形呢。罗马士兵命令他离去，阿基米德严肃地做了一个手势，说："别把我画的圆弄坏了！"罗马士兵对此不屑一顾，手起刀落，将阿基米德杀死。就这样，一颗科学巨星陨落了。

石器制造的技术

距今两三百万年前的古人类——猿人就已利用石头制造工具，这些石制的工具统称为"石器"。猿人使用石器的时期也就被统称为"石器时代"。

1. 制作石器的方法

制作石器，比较简单的方法是碰砧法。最初，原始人手拿一块石头，用它碰一块大石头，看碰碎的石头中有没有适宜用来做工具的碎块。有的话，就用它去干

活；没有的话，就再找一块石头去碰那块大石头。这块大石头就相当于后来铁匠铺里的大铁砧，所以后人把这种方法叫作“碰砧法”。

碰砧法看似简单，但要碰制出合用的石器是需要一些技巧的，也具有很大的偶然性。后来，人们又发明了新方法——砸击法：先找一块大石头做砧，再找一块不太大的石头做锤，把一块石头放在砧上，用锤敲击它，直到将小石头敲成合用的工具。

第三种方法是锤击法。人们双手分别拿着一块小石头，一碰，石头裂开，看哪块石头适宜做工具。

通常，这三种方法是组合利用的。比如，用锤击法得到的石头不太合用，就用砸击法修理，直到合用为止。

2. 石器的种类

在石器时代，为了生存，人们要进行各种活动。在这些活动中，人们发明了各种各样的石器，像刮削器、砍斫（zhuó）器、尖状器、手斧（图1-2）等。日常生活中，我们用到刀子的机会是很多的，如削水果皮、削铅笔、切菜、割草等。这种工具是比较轻，刃口也比较薄。石器大致也是这样的，像边刮器、各种石片等的刃口比较薄，有些刮削器还具有多个刃口，如复刃刮削器及具有刮削圆棒和圆环功能的凹刃刮削器。如果要砍树和敲出骨头中的骨髓，用又轻又薄的刮削器就有些力不从心了，这就要用砍斫器、手斧或手镐。这类石器较大而重，属于重型工具。

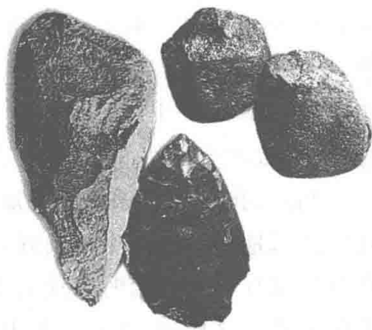


图 1-2　石器和制作石器的石核（右上）

用火的技术

古人很早就注意到自然界的野火和火山喷发出的火焰。熊熊大火令人恐惧，但它也让人觉得很温暖。火熄灭之后，古人偶尔还会在灰烬中发现一些山鸡或野兔之类的“烧烤”，香气四溢，令人食欲大增且比生肉更易消化吸收。那么，我们的祖先是什么时候开始使用火的呢？他们是如何得到“火种”的呢？

位于北京东南的房山区内有一个蜚声中外的小镇——周口店。镇西有一座“龙骨山”。这里就是“北京猿人”（简称“北京人”）的家。

20 世纪 20 年代，科学家在这里发现了“北京人”的遗址。在 60 万年前，“北京人”就生活在这里，而更令人惊奇的是，科学家发现四十多万年前的“北京人”已经开始用火。他们遗弃的骨头和石头有烧过的痕迹。这些烧过的石头上还有裂

纹，并且表面也变得酥散了。

"北京人"用火取暖、照明和加工食物，这大大方便了在夜间的活动，并且大大改善了居住条件。更重要的是，用火加工过的食物更可口，也更有益于人的肠胃消化和吸收食物中的营养。因此，用火和取火的技术大大促进了远古社会的发展。

随着时间的流逝，人们找到了保存火种的方法，如使篝火持续燃烧等。这些保存火种的方法，人类一直在使用。在远古人类的长期实践中，人们还发明一些取火的方法(图 1-3)。



图 1-3 "北京人"取火图

传说，远古时期有一位聪明的部落首领，叫"燧人氏"。在他的部落有一棵大树，叫"遂木"。每当要取火时，燧人氏就折下一些树枝，用小树枝在大树枝上一钻，就可以产生火花，借此就可以点燃草木，取得火种。

当然，我们现在已经无法知道远古时期的人类是如何取火的。但是，生活在我国边远地区的一些少数民族，在几十年前还在使用一些原始的方法取火。有人至今还保存着一些当时取火的工具。在他们使用的方法中就有钻木取火。这种方法大致是这样的：先砍一些山麻木，将麻木制成扁平的形状。在上面挖一些浅坑。再找一根木棍，将它的一端修得稍微尖一些。然后将这稍微尖一些的一端插入山麻木的浅坑内，双手用力搓。由于木棍与山麻木之间剧烈摩擦，产生大量的热，并且在浅坑边上积累了一些热木屑。随着不断摩擦，木屑的温度不断升高，并最终燃烧起来。如果事先在浅坑边上放置一些干草，这些干草就会被木屑点燃。

在西方，人们流传着一个古希腊英雄取天火的神话故事。

这是一位闪耀着英雄主义色彩的天神，他的名字叫普罗米修斯。据说，普罗米修斯与天神宙斯的女儿雅典娜游戏。普罗米修斯用泥土捏造了一些小泥人，雅典娜对这些小泥人吹气，它们就变成了具有生命的最初人类。这同中国女娲"抟土造人"的传说是非常相似的。

火对人类文明的发展至关重要，但天神宙斯不愿让人类得到火种，命令将所有的火种藏好。善良的普罗米修斯决心帮助人类搞到火种。他趁太阳神阿波罗驾驶太阳车在天空飞行时，用树枝将火从太阳那里取到人间。不幸的是，他的行为被宙斯发现了。为此，宙斯派天神将普罗米修斯悬吊在高加索的山崖上，每日让巨鹰啄食普罗米修斯的肝脏，今日啄完，明日复生，普罗

米修斯日复一日地承受着痛苦。(图 1-4)

普罗米修斯的精神曾经激励人类勇于向恶势力挑战,鼓舞了人类不怕牺牲和战胜困难的勇气,普罗米修斯为人类幸福而献身的英雄行为一直受到人们的颂扬和效仿。



图 1-4 普罗米修斯"盗取"天火

原始人类用火制作器皿的活动大约发生在 9 000 年前。他们发明了烧制陶器的方法。在此后的几千年中,人们烧制了大量陶器,不仅方便了人们的生活,而且"烧制"出一个精美的陶器世界。

生产陶器要先有陶土,用一般的黄土制作陶坯,烧制时容易产生裂纹,所以最好用红土、黑土或黏土等。为了防裂,还要掺入一些沙粒或稻草末。

在早期制作陶坯时,分为手制和轮制两种。手制工艺比较简单,就像小孩和泥捏制一些小玩意儿。如果要烧制一个陶盆,先滚制一个泥条,将它盘成一个盆。由于表面不平,可以用手或石刀和木刀将表面抹平。后来,发展出一种轮制工艺:先把泥条盘成的盆放在一个轮盘上,旋转轮盘,同时将盆的表面抹平。这样可以提高制作的速度,并且可以将盆的表面抹得更平。



图 1-5 西安半坡遗址出土的彩陶盆

在早期制作的陶器中,大多以红陶为主。这样的陶器往往要用黑色的墨线在表面绘制图案,艺术感很强(图 1-5)。

狩猎与力的知识

远古的人类为了得到更多的食物特别是肉食,要制造精良的武器。为此,先后发明了投矛器、流星索和飞去来器等。

1. 投矛器

远古时期,人们猎取像鹿或羚羊之类的动物是很不容易的,因为这些动物跑得很快。那么,远古人是怎样猎取这些动物的呢?

这要从扔掉的骨头说起。开始,人吃完骨头上的肉以后就把骨头扔掉。后来,人们觉得骨头是有些用处的,例如,将它磨成针,用于缝纫,锋利的骨针还可以刺穿毛皮。选用粗一些的骨针,将它安装在一个木棍上,就制成了一个投矛器。体力强健的人可以将它投得很远,对动物和敌人具有很强的杀伤力。

后来,人们还将骨制品用于改进鱼钩,制成带倒刺的鱼钩。用它钓鱼,一旦钓

住鱼就很难逃脱了。如果将倒刺结构应用在投矛器上，在矛尖处制上倒刺，扎到动物身上后它想甩也甩不掉，难以逃脱。

2. 流星索

远古人类在围堵猎物时，力气小的人站在一旁呐喊助威，力气大的人就向猎物投掷石块或投矛器。现在，考古人员在一些远古人类的遗址发现了许多石球，这些石球就是用于投掷猎物的。但是，投掷石球时，石球太重则不能投得很远，石球太轻则对猎物的作用不大。

经过长期的摸索，人们发明了一种投石索，就是用绳索拴住石球（或石块），使用时用手抓牢绳子的一端，将拴有石球的另一端“抡”起来，在保证绳子不断开的情况下，让石球获得很高的速度，然后甩出去，石球带着绳子就飞出去了。由于在“抡”的时候，石球获得了很大的速度，可以飞得很远。如果投手具有一定的经验，这个石球可以具有很大的打击力量。因此，这种工具在猎取动物时会发挥很大的作用。


图 1-6　流星索（复原图）

由于石球飞出去快得像流星一样，并且它还带着一根绳索，就叫它“流星索”（图 1-6）吧！

3. 飞去来器

2000 年，澳大利亚悉尼市举办了第 28 届奥林匹克夏季运动会。当时，人们的目光都注视着悉尼，但很少有人注意到澳大利亚人设计的运动会会徽。这个会徽非常别致，主体是一个跨步飞奔的运动员形象。仔细观察，会发现这个运动员是由几个“飞去来器”组合而成的（图 1-7）。“飞去来器”是澳大利亚土著居民打猎的工具和作战的武器。在悉尼奥运会开幕式上的大型舞蹈中，第三幕《觉醒》表现了土著人生活和生产的场景，这些“土著人”一手拿着树枝，一手拿着飞去来器。



图 1-7　悉尼奥运会的图徽

飞去来器也叫“飞镖”或“回旋刀”。现实中的飞去来器是用硬质曲木制成的。熟练的投镖人手一挥，飞去来器出手就在空中画出一道漂亮的曲线，并且击中目标。如果没有击中目标，这个飞镖还能飞回投镖人的手中。这也就是叫它“飞去来器”的原因。

澳大利亚的飞去来器固然有名，其实中国远古时期的人类对此也不陌生。中

国考古工作者曾在江苏省海安县发掘出6件飞去来器和一些骨制的箭头。墓主人是一男子，可以想见，他大概是一位技术高超的猎人。他的飞镖不用硬木，而用的是鹿角。他利用了鹿角的自然分叉，3个尖端都磨得非常锋利。为了减小飞行的阻力，这个猎人还将它整体磨平了。

经过长时间的摸索和研究，人们对"冲击力"有了一定的认识，到了战国时期，著名的科学家和工程师墨子对此给出了力的明确定义。他在《墨子·经上》中写出了"力"的定义：

力，刑(形)之所以奋也。

《经说上》对此有解释：

重之谓下，举重，奋也。

这里的"力"可视为运动变化的原因。根据"奋"的字义解释为物体由静而动、动之愈速的情况，或者解释为由下上升("举重")的意思。如是说，可以得知，在力的作用下，物体能飞快地运动。

甲骨文中的"力"字象形人用农具奋力翻土，可比喻为体力。所以，在我国古人的朴素认识中，力就是身体用以克服阻力的原因。以重力为例，重力是向下的力，举重就是"奋"。

弓弩与弹性的知识

被投掷出去的投矛器、流星索和飞去来器所获得的速度是比较小的，射程也不远。因此，用它们在捕捉一些跑得快的动物有时就难以奏效。弓箭的发明使猎人的本领更大了。

到距今30 000年前，人们制造石器的技术更高了。许多石器都用磨制的方法加工，更加锋利。比如说，磨制刀片，并为它加一个柄，用起来很方便。制作小投矛器，它的矛尖很小，力量小些，但投得远。更小的投矛器可放在弯曲的木棍上弹射出去，还能射得更远些。虽然我们不知道弓箭是谁在什么时候发明的，但基本可以肯定这种发明出现得比较晚，因为弓箭的发明是将两样东西组合起来，是需要较高的技术水平的。

一般来说，一个人可将投矛器投出去七十多米，如果用弓箭则可射出九十多米。美洲的印第安人还发明了重弓，射程可达四百多米。

弓箭的发明使打猎的技术获得了极大的改进。弓箭发明前，人们主要用围猎的方法，逼得野兽走投无路，再将野兽击毙或活捉。弓箭发明之后，使人的能力大大增强了。有时一两个猎人就可猎获较大的野兽，那种动员许多人围猎的方法已不再是主流了。

射箭要想射中目标，要苦练，要按照一些要领练习。比如，拉开弓要稳，射箭前要瞄准。瞄准好坏是影响射箭命中率的关键因素。瞄准时，要屏住呼吸，手臂要稳，瞄准之后再放手将箭射出(图 1-8)。


图 1-8　古人射箭图

弓箭成为猎人的武器并体现出其远程杀伤力后，它还成为士兵打仗的武器。作战时，弓箭手要一支一支地将箭射出。敌人蜂拥而上时，射箭就难以阻止其进攻了。况且，射箭是很费力的，要消耗大量的体力，往往到后来就射不准了。为了消除这些缺点，人们便对弓箭进行了改进。

怎样改进呢？我们知道，在打猎时，猎人碰到像野猪、老虎、狮子、豹子之类的野兽，是很难将它们猎杀的。为此，猎人就在野兽经常出没的地方放上一张弓，将它拉满，并把弦卡在一个卡子上。这个卡子与一根木棍的一端连接起来，另一端顶在固定的石头或树干上。安置好后，再将箭杆放置在弓弦上。野兽碰到棍子时，棍子松开卡子，箭就射了出去。由于箭是事先设置好的，指向是固定的，野兽往往可被击中；又由于距离很近，箭的力量很大，被击中的野兽是难以逃掉的。

这种打猎的方法对工匠有一定的启发：如果将弓水平拉开，并固定在一个卡子上，将箭放好并瞄准后再将箭射出。由于不必拉着弓时瞄准，这样射箭的命中率应该比应用弓的射箭方法的命中率要高。于是，就发明了弩。在汉朝时，汉军使用了大量的弩。在战场上使用弩的士兵可达 50 000 人，仓库中常常储备有十多万张弓弩，所以汉军保持了很强的战斗力。后来，人们又对弩进行了改进，像三国时诸葛亮设计的弩可以同时射出几支箭。魏国的马钧听说后，又设计出可以同时射出更多支箭的弩。

在长期使用弹性材料的过程中，人们注意到材料形变的规律。最早对此进行总结的内容记录在周代的《考工记》中："量其力，有参(三)均(钧)"。东汉的郑玄(图 1-9)对此进行了注释：


图 1-9　郑玄像

> 假令弓力胜三石，引之中三尺，弛其弦，以绳缓擐(huàn)之，每加物一石，则张一尺。

其中的"缓擐"是很松地套上，没有力的作用。唐初，贾公彦对郑玄的注释又做了进一步的注解。他指出：

> 郑又云"假令弓力胜三石，引之中三尺"者，此即三石力弓也。必知弓力三石者，当"弛其弦，以绳缓擐之"者，谓不张之，别以一条绳系两箫(指弓的两

端，编者注)，乃加物一石张一尺，二石张二尺，三石张三尺。

可以看出，郑玄和贾公彦的论证都是很朴素和简明的。从《考工记》的记述来看，当时制作的弓多为三钧(即 90 斤)拉力的弓，这可能是当时较为标准的弓。明代的宋应星也指出：

凡造弓，视人力强弱为轻重：上力挽一百二十斤，过此则为虎力，亦不数出；中力减十之二三；下力及其半。

对于弓的制作和检验，在《天工开物》中有图示加以说明，对应的文字是：

凡试弓力，以足踏弦就地，秤钩搭挂弓腰，弦满之时，推移秤锤所压，则知多少。

可见，测量弓力还要借助杠杆的办法。

西方对于弹性原理的实验和论证是比较晚的。到 1676 年，英国物理学家胡克以字谜的形式发表了关于弹性力的定律。1678 年，他公布了谜底，其中文的意思是有多大的伸长就有多大的力。由于郑玄的研究贡献，有专家曾经指出，以胡克名字命名的定律名称是否应更改为“郑玄-胡克定律”? 这倒不一定非改不可，但人类对弹性定律的准确认识并不首现于 17 世纪，而是在公元 2 世纪就开始了。

浮体和浮力的应用

关于浮体，水上的船只是最早的实例。除了应用，人们对浮力也开始研究，而这种研究的记录最早出现在《墨子》一书中。

《墨子·经下》有载：

形之大，其沉浅也，说在具。

《墨子·经说下》注释：

形：沉形之衡也，则沉浅非形浅也，若易五之一。

墨家的实验比较直观。他们将浮体放入水中，浮体会部分沉没水中(“沉形”)，在平衡的时候(“衡”)，浮体下沉的深度小于浮出的高度(“沉浅非形浅”)。整个浮体的重量与水对物体的浮力相等，这就好比在市场上用 5 件商品与 1 件商品的等价交换。

关于浮体的记载，南宋吴曾在《能改斋漫录》中曾经记载：

朔人献燕昭王以大豕，曰：养奚若? ……王乃命豕宰养之。十五年，大如沙坟，足如不胜其体。王异之，令衡官桥(秤杆)而量之，折十桥，豕不量。命水官浮舟而量之，其重千钧。

这就是说，燕昭王命人把北方人送来的一头猪养了起来，由于喂养得太肥了，猪的脚已经不能承载它的体重了，使用最大的杆秤也不能称出它的体重。因此，

燕昭王命“水官”用船来称重，这才知道猪的体重已重达千钧了。

在《三国志》中也记载了一个著名的故事——“曹冲称象”。这个故事是读者熟知的。曹冲使用的方法与燕昭王的方法一样。

在宋代，一位名叫怀丙的和尚曾利用浮力来打捞铁牛。据说，在黄河山西蒲州段有一座浮桥，桥缆用铁牛固定在河两岸。公元1064年，洪水将铁牛冲入河中。当地人想把铁牛捞出来，但却无计可施。怀丙到达此地，想出办法捞铁牛：用两只装满土的船与河底的铁牛连起来，然后将土除去，使得铁牛浮出水面。应该说，这是一件应用浮力的极好事例。

对于浮力的应用，中国古人还创制了世界上最早的测量液体密度的仪器。11世纪，姚宽用莲子测试盐卤的质量（即浓度）：他精选出一些较重的莲子，将10粒莲子投入水中，若有3粒或4粒浮出，便是浓盐卤；若有5粒浮出，便是最浓的盐卤；若浮起的莲子不足3粒，则盐卤的质量必定是很差的；若10粒都沉底，这种盐水即便经过蒸煮也不会得到食盐。

元代的陈椿对姚宽的方法进行了改进，制成了一种莲子式的液体密度计。他把盐卤分为“四等”，“采石莲先于淤泥内浸过”，再将“石莲”分别浸入这些盐卤之中。最咸的卤浸在一处，“三分卤”（只含有四分之一的水分）浸在一处，“一半卤”（还有一半水分）浸在一处，“一分卤”（还有四分之三的水）浸在一处。后用一竹管盛此四等所浸莲子四枚于竹管内，上用竹丝隔定竹管口，不令莲子漾出。以莲管吸卤试之，视四莲子之浮沉以别卤咸淡之等。

这4枚经不同液体浸泡过的莲子相当于密度不同的色球，它的原理与现代的浮子式密度计很相近。明代时对这种密度计又进行了改进，即只用一枚莲子来测定盐卤的浓度，原理与现代的浮笔式液体密度计相似。

气压的认识和运用

人类对于气压的知识是一点一滴地积累起来的，并且渐渐地运用在许多地方。最常用的就是拔火罐了。这是一种应用较多的治疗方法，且简便易行。

气压知识在古书中有很多记载，如在《关尹子》（南北朝时成书）中记载：

瓶存二窍，以水实之，倒泻；闭一则水不下，盖（气）不升则（水）不降。井虽千仞，汲之水上，盖（气）不降则水不（升）。

唐代的王冰也进行过类似的探讨：

虚管溉满，捻之悬之，水固不泄，为无升气而（水）不能降也；空瓶小口，顿溉不入，为气不出而（水）不能入。

瓶子中的水，上升也好，下降也好，都是大气压的作用，前者的“瓶存二窍”和

后者的“虚管”讲的是一种情况：如果只有一个出口就倒不出水来。而且只有一个小口的瓶子，将水迅速（“顿”）灌入瓶子也是不可能的。

宋代的俞琰转述了王冰的发现，同时讲述了他曾经见到过的演示。他写道：

> 予幼时有道人见教。剧烧片纸纳空瓶，急覆于银盆之中，水皆涌入瓶，而银盆铿然有声，盖火气使之然也。又依法放于壮夫腹上，挈之不坠，即如铜（管）水滴，捻其窍，则水不滴。

这不就是“拔罐子”嘛！虽然俞琰用“火气”解释有些笼统，但道人的演示（实验）却是很明确的，给人们的印象也很深刻。

值得注意的是，1992 年，考古工作者在山东临淄商王墓地两座战国墓中发掘出几百件器物，其中一号墓中出土的一件非常精巧的铜器引起了人们的注意。这是一件荷蕾形的铜器，它的长柄呈竹节状并中空直通底部中空的荷蕾，荷蕾的底开口。此外，在柄的上部开有一个小孔，此小孔经过“竹节”与荷蕾的底部相通。这件铜器全长 65.4 厘米，柄的外径为 1.4 厘米，内径为 0.8 厘米，蕾形器的腹径为 7.2 厘米。初看上去，这是一件很精巧的工艺品，用途并不明确。由于它与一些饮食器物放在一起，估计它也应与饮食有关。从它的外形来看，柄在上，蕾在下且为开口的平底，可能是一种“汲酒器”或“汲水器”（图 1-10）。考古人员进行了实验研究，发现将它竖直插入水中，水由圆孔进入器内，空气则由方孔排出，水流出，空气又从方孔中被吸进。水进入器内后，若用拇指压住方孔将它提起，器内之水不会滴洒；放松拇指，器内的水则缓缓流出。从这个过程可以看出，“汲酒器”利用了大气压强的作用。如果说，商代关于虹的记载是将虹看作一种巨物吸水，也就像人吸水一样，而战国时期的汲酒器则表明当时人们已明确认识到大气的作用，尽管“虹吸”与“汲酒”似乎是风马牛不相及的。汲酒器蕴含的科学价值是显而易见的，集中体现出人们对自然的认识水平，匠人运用高超的智慧把科学与艺术相结合，使之成为古代酒器中一件非凡的作品。中国古人对大气压的认识和利用，比 1654 年欧洲进行的马德堡实验要早得多。

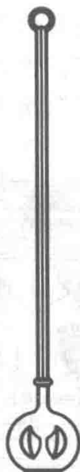


图 1-10 “汲酒器”示意图

力之种种

西汉淮南王刘安组织了许多文人与他一起从事研究工作，完成了《淮南万毕术》。遗憾的是，这本书已经失传了，只有很少的内容流传下来。不过，我们仍能

从这很少的内容中看到当时学者们的见识。其中,关于表面张力效应的认识就是一个重要的例证。

1. **表面张力的游戏**

《淮南万毕术》中写道:"首泽浮针"。其注文是:"取头中垢以涂针,塞其孔,置水则浮。"即用头皮脂涂针,并且塞上针眼,放在水面上,针就可以漂浮。为了得到更好的效果,须用头皮脂("首泽")来润滑针。这是对表面张力现象较早的观察。这种"首泽浮针"的方法一直在民间流传,并逐步演变为一种游戏,即在农历七月初七女子要玩一种名叫"乞巧"的游戏,就是将针放在水面上,谓之"丢针"。

利用表面张力的另一种游戏是吹气泡。据说,明朝天启皇帝也玩这种游戏。他将松香末加入浓碱水中,然后用小篾圈挥之。其实,这种小篾圈就是一种"表面张力演示仪"。宋代有人就用这种装置测量桐油的质量,是这样进行的:用细竹篾做成一个圆圈,将这个圆形的竹篾圈蘸上桐油,若桐油质量很好,竹篾圈上会有一薄层油膜;若桐油含有杂质,则油膜就不附着在竹篾圈上。

2. **热力驱动的走马灯**

走马灯往往在上元灯节时展示。它是唐代的一种彩灯,也被称为"影灯"或"转灯"。古人曾有诗句"转影骑纵横"(南宋范成大)、"纷纷铁马小回旋,幻出曹公大战车"(南宋姜夔)等来描述走马灯。人们描述走马灯,说"沙戏影灯,马骑人物,旋转如飞"(周密),其中的"影灯"就是走马灯。走马灯的结构大致是这样的:"走马灯者,剪纸为轮,以烛嘘之,则车驰马骤,团团不休。烛灭则顿止矣。"


图 1-11　走马灯的结构

走马灯是一种利用热力驱动的玩具(图 1-11),结构和原理都不复杂。但是,从原理上看,它却是现代燃气涡轮机的始祖。走马灯以灯烛的燃气做动力来驱动轮子,轮子上车马形状的轮扇转动起来;灯烛灭时,动力消失了,轮子就不转了。如果轮子转动速度合适,在灯罩上形成的投影也是动态的,形成旋转的动画。看上去很有趣!

有关铜镜的认识

古镜多为铜镜,先秦时期的铜镜铸造技术已经成熟了。《考工记》中称铜镜为"鉴燧",有的也叫"阳燧"。在青铜时代,"鉴燧"可用来取火。周朝的专家记载了铸镜原料的合金成分,青铜中的含锡量要达到 50%,这样的含锡量可以增加磨制后表面的光洁度。

镜子要常常磨光，以保持良好的反射性能。在古代，代人磨光镜子也成了一种职业。据说，汉末有一位名士，叫徐孺子。他的老师家在江夏，老师去世之后，徐孺子想去祭拜老师，但家境穷困，难以前往。不过，徐孺子有技术——磨镜子。路途中他就为人家磨镜子，赚得一些钱用于吃饭和住店。最后，他终于到达江夏，祭拜了自己的老师。《淮南子》中记录了铜镜的抛光方法。一般来说，磨镜子要用"玄锡"：先把"玄锡"涂覆到镜面，使用细白的毛织物反复擦拭。"玄锡"是什么东西呢？它的主要成分是水银。利用该方法可以使镜面清楚地显现出"鬓眉微毫"。其实，镜子保养得好，不仅照人面更加清晰，而且还可延长其寿命。

当时的铜镜，除了有良好的反射性外，还考虑到极好的装饰性。采用浅浮雕、透雕、"错金银"(镶嵌金银丝)等工艺，可以使镜体的图案精美，使铜镜成为珍贵的艺术品，流传至今的大多已成为上等的收藏品。

人们有时还把镜子写入诗句。像南宋大思想家和文学家朱熹就有一首有关镜子的诗广为流传。在这首名为《观书有感》的诗中他写道：

半亩方塘一鉴开，天光云影共徘徊。

问渠哪得清如许？为有源头活水来。

禅宗五祖(弘忍)要测试大家的"悟性"时，出了一道题。当时有两个和尚——神秀和惠能就各写了一首诗(称为"偈")：

身是菩提树，心如明镜台。

时时勤拂拭，勿使惹尘埃。

——神秀

菩提本无树，明镜亦非台。

本来无一物，何处惹尘埃？

——惠能

他们的诗中充满"玄机"，但都是以镜子为主题来体现出其各自的"悟性"。看上去，他们讲的不过是镜子的保养方法，但实际上却反映出其悟性之高下。这也算是有关镜子的一段"传奇"吧！

凹面镜和凸面镜的研究

《墨子·经下》中写道：

鉴笠，景一小而易，一大而正，说在中之外，内。

《墨子·经说下》注解：

分鉴：中之内，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而

必正，起于中燧正而长其置也。中之外，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而必易，合于中长置也。

由于凹面镜的内表面像一个“斗笠”，墨家便将之称为“鉴笠”。它所成的像只有两种：缩小的倒立像（“小而易”）和放大的正立像（“大而正”），并且分别成像在球心之外和之内（“说在中之外，内”）。墨家还解释了“分鉴”，即处在球心内外来照镜子的情况：物体处在球心之内时，物体离球心近些（“鉴者近中”），则物体看上去要大些（“则所鉴大”），形成的像也要大些（“景亦大”）；物体离球心远些，则物体看上去要小些，形成的像也要小些，这时像必定是正立的（“而必正”）。物体应是从焦点开始（“起于中燧”），正立着往镜面方向挪动其位置的（“正而长其置也”）。物体处在球心之外时，如果物体离球心近些，则物体看上去要大些，这样形成的像也要大些；物体离球心远些，则物体看上去要小些，这样形成的像也要小些。在这种情况下，像必定是倒立的（“而必易”）。物体是在球心同自己的像重合（“合于中”）之后，再背着镜面挪动其位置。

由此可见，当时墨家已知凹面镜具有焦点（即“中燧”）了，这个名字表明大概是从取火时的聚光点发现其焦点的。

不过，墨家并未发现凹面镜成的第三种像，即当物体处在其球心与焦点之间时，能形成放大的倒立像。这大概是因为墨家在观察凹面镜成像情况时，并未将像投在屏幕上，而是用眼睛直接接收像。然而，有趣的是，在 1907 年，英国剑桥大学曾出过一道类似的考题。考官哪里知道，在 2 300 年以前，墨家师生就曾分析到这样的问题！有人怀疑，这第三种情况可能是由于成的像在人（就是物）的后面，人无法看到像，因为人眼是通过凹面镜来看人脸或人体的。

关于凸面镜，在河南安阳的殷墟 5 号墓（“妇好墓”）发掘出的铜器中，有 4 枚铜镜，其中有一枚镜面微凸出。在河南安阳侯家庄 1005 号墓中也出土有镜面微凸的铜镜。这些文物的科学意义是很明显的，它标志着铜镜的镜型开始从平面镜向凸面镜发展。春秋战国时期，墨家也对凸面镜进行了研究。

《墨子·经下》中写道：

鉴团景一。

《墨子·经说下》释之：

鉴者近，则所鉴大，景亦大；亦（其）远，则所鉴小，景亦小。景过正，估绍（diào，意短小）。

“鉴团”就是凸面镜，它所形成的像只有一种，即凸面镜所形成的像总是正的（“必正”），恒位于镜面的另一侧（“景过正”），估计比物体总是要小一些（“估绍”）。

宋代的沈括(图 1-12)在其著作《梦溪笔谈》中写道:

古人铸鉴,鉴大则平,鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大,凸则照人面小。小鉴不能全视人面。乃复量鉴之小大,增损高下,常令人面与鉴大小相若。此工之巧智,后人不能造。比得古鉴,皆刮摩令平。

沈括的研究与墨家的结论非常相似,可以看作墨家研究的注释。"小鉴不能全视人面"与"多而若少,说在寡区"是一致的;"凸则照人面小"与墨家的结论也一致。此外,沈括还进一步指出,反复试验后,可以通过使用"增损高下"之法即改变镜面的曲率,改善成像的质量,并使镜面大小与人面大小差不多。



图 1-12 沈括像

平面镜的游戏

四千多年前分布在黄河上游地区的齐家文化(属新石器时代晚期)遗址中就有不少铜镜出土。春秋战国时期,人们使用铜镜就较为普遍了。墨家对平面镜也有所研究,《墨子·经下》中写道:

临鉴而立,景倒;多而若少,说在寡区。

《墨子·经说下》:

正鉴,景寡,貌态,白黑,远近,斜正,映于光。鉴[者],鉴当俱就;去亦当俱,俱用背。鉴者之臬,于鉴无所不鉴;景之臬无数,而必过正;故同处。其体俱然。

这里的意思很明显,这是把平面鉴放在平地上,人站在镜的一侧,所成的像是倒立的;镜子反映的物体是很多的,但观察者看到的却很少("多而若少"),这是由于镜面小("说在寡区")。又指出:平面镜成像只有一种("正鉴,景寡"),像的形态、明暗、远近、斜正是从光线映出来的;照镜子的人相对镜子运动时,他和镜像应该一起走向镜子("鉴者景当俱就"),离开镜子也应一起("去亦当俱"),而且都背向镜子("俱用背");若物体分解为"物点"。各个物点("鉴者之臬")在镜里都能反映出来("于鉴无所不鉴"),物点是无数的,因此像点也应是无数的("景之臬无数"),而像点必定位于镜面的另一侧("必过正"),故物点与像点与镜等距离("故同处");像的每个部分和人体相应部分之间的关系均如此("其体俱然")。

墨家对平面镜成像的研究与分析取得了重要的进展,他们认识到物与像到镜面是等距的,特别是物与像的对应关系是点点对应,这不但是像不会失真的原因,而且是一种重要的分析方法。

平面镜也可以组合起来应用。刘安等人曾记载：

取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。

他们可以从水盆看到“四邻”，即水盆中的成像是映射的“大镜”传来的四邻影像。这种装置可以看成是世界上最早的潜望镜(图 1-13)。

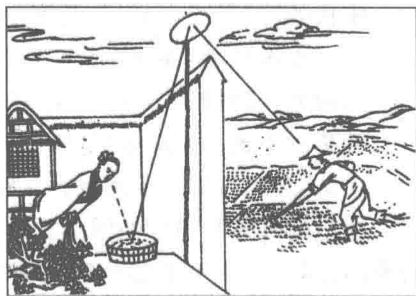


图 1-13 高悬镜子可“潜望”

隋唐时期，有人曾为《庄子·天下》作注，他指出，如果两面镜子平行相对(称为“日月镜”)，可以看到：“鉴以鉴影，而鉴以有影，两鉴相鉴，则重影无穷”。这真是“照花前后镜，花花交相映”。

晋代葛洪也曾提出一种“四规镜”。这是在房间四面装镜，人在房中可以看到许多自己的像。南唐谭峭也注意到：

以一镜照形，以余镜照影，镜镜相照，影影相传。

据说，唐代的一些寺庙中设置了一些镜子，在火炬的照明下，照映佛像，经过诸镜反复反射，可以形成众多的佛像，营造出一种幻景般的佛像世界。由此可见，平面镜的知识并不复杂，古人们除用它映照出人面之外，又设计出如此多的运用，这大大丰富了人们的生活，充实并愉悦了人们的精神。

复合透镜——蝴蝶杯

在《淮南万毕术》中记载：当时有人曾“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生”。

这里提到的实际上是一种冰质透镜，令人觉得新奇的是，它竟然可以用来取火。后人看到这种记载难免会产生怀疑，于是清朝中叶科学家郑复光重复了这个实验。今天，几乎家家都有电冰箱，我们不妨制作一个冰透镜，借机来测试一下自己的“动手能力”。美国中学的物理教科书中就有关于冰透镜的实验，并且要求学生自己在家中完成。

不过，冰透镜的制取是有条件的，也难以久存。因此，一般要选取玻璃和水晶之类的材料制作透镜。

在我国传统戏曲中有一个流传很广的剧目——《蝴蝶杯》。剧中男主人公家中有一个传家宝，是一个蝴蝶杯。这个杯子很奇特，倒进酒时就会看到一只蝴蝶在杯中翩翩起舞。杯中酒尽之时，蝴蝶又悄然隐去。如此神奇，难怪他要把这个杯子当成家中的宝贝了。这是我国古代曾出现复合透镜的旁证记载。

1980年,山西侯马市的研究人员经过努力,仿制成功蝴蝶杯。如图1-14所示,杯子外形像一个小巧玲珑的反口铜铃,开口较大,脚座很细。杯内有些装饰性图案,且杯底中央镶上一个凸透镜片。注入酒水后,就可以看到一只彩蝶“起舞”。这个效应并不奇怪。原因是在杯脚内用细弹簧装有一只彩蝶,只要有很小的扰动,彩蝶就会晃动不止。

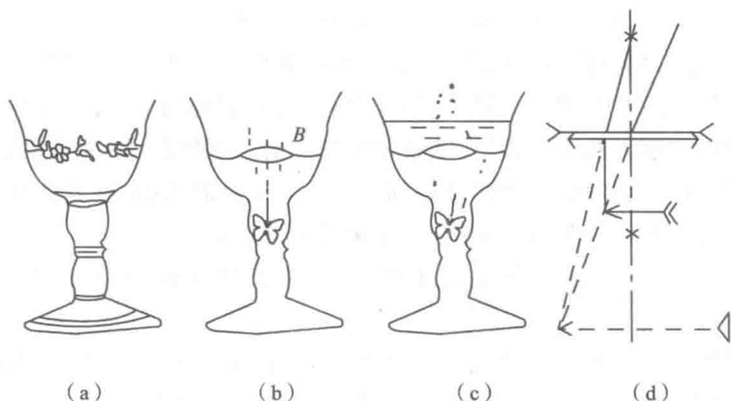


图1-14 蝴蝶杯示意图

蝴蝶杯的成像原理是:彩蝶位于凸透镜焦点之外。杯中无酒时,彩蝶成实像,其位置在杯子的上方,与人眼同侧,但成像的位置未能在人眼所观范围内,因此人眼视之很模糊。酒水注入杯中后,酒受杯的约束而构成了一个液体的凹透镜,并且同凸透镜形成一个复合透镜。复合透镜的焦距要比单凸透镜的焦距要大,这样,彩蝶就落入复合透镜焦距之内,并且在明视距离上形成一个虚像,此时(已放入酒水)复合透镜像一个放大镜,可以看到一只放大的彩蝶像。酒杯微动时,蝴蝶好像受到“惊吓”而飞动不已。

关于这种复合透镜的其他应用,宋代何薳的《春渚纪闻》中曾记载过“鲫鱼杯”,宋代以后,明清的学者也有类似的记载。由此可见这种民间工艺流传之久。

古老的光艺术——影戏

影戏是中国的一种传统艺术曲类。传说,汉武帝时,皇妃李夫人去世,汉武帝非常思念她,当时一位名叫少翁的方士对汉武帝讲,他可以让汉武帝见到李夫人,但只能远看。到夜里,他在帐子里点上灯烛,让汉武帝在外面张望。这时,见一好似是李夫人的女子在帐内行走或坐思。这位方士的方法是让人穿戴着李夫人的衣服模仿李夫人的动作,这种表演是活人动作的光投影。这个传说流传得很久很广。其实,更早的传说是,汉文帝时宫妃曾抱着太子在窗前玩耍,她把桐树叶映在

纱窗上表演，以取悦太子。

隋唐时期，流行着一种“幻术”，可视为影戏的雏形。隋大业年间，有一位名叫宋子贤的人就擅长“幻术”。当时的记述是：

每夜楼上有光明，能变作佛形，自称弥勒佛出世。又悬镜于堂中，壁上尽为兽形，有人来礼谒者，转其遣现来生象，或作蛇兽形。子贤辄告之罪也，当更礼念，乃转人形，远近惑人数千百人……

这种“幻术”是将像投影在墙壁上，而所悬挂的“镜”可以是反射镜，利用镜子将影像加以反射后投在壁上。这种“幻术”用来表现观者的“来生”状况，可以非常逼真，因此可以“惑人数千百人”。从技术的角度看，这种“幻术”的效果是不错的。

真正可以称为影戏的艺术活动是到了宋代才成熟起来的，并且达到了很高的水平。这时的影戏可以表演历史故事，张耒曾记述道：

京师有富家子弟……甚好看影戏，每弄至斩关羽，即为泣下，嘱弄者且缓之。

这时的影戏可分为三种：“人影”“乔影”和“手影”。作为一种共性的技术形式，它们都是借助光源（通常是烛光）、屏幕和造型（以形成影像）来构成的。宋代对形成影像的造型设计不断加以改进，像吴自牧所说：

原汴京初，以素纸雕簇，自后人巧工精以羊皮雕形，用以彩色妆饰，不致损坏。杭城有贾四郎、王升、王闰卿等，熟于摆布，立讲无差。其话本与讲史书者颇同，大抵真假相半。公忠者雕以正貌，奸邪者刻以丑形，盖亦寓褒贬于其间耳。

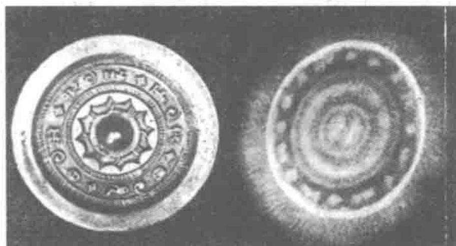
可见，在宋代匠人就开始用羊皮雕塑形象。这也就是谓之“皮影戏”的原因。

此后，皮影戏非常流行，特别受到儿童的喜欢。到了元代，蒙古人的势力范围横跨欧亚大陆，非常有利于中外科技和文化的交流。这时，中国人把皮影戏带到了中亚一带，并受到当地人的欢迎。后来皮影戏还传到了欧洲，欧洲人也非常喜欢皮影戏。据说，1774 年，德国大诗人歌德将皮影戏从法国介绍到德国，并在 1781 年歌德生日宴会上演出了名叫《宋拉瓦生平》的皮影戏。

影戏是应用光的知识来进行影像创作活动的，同今天的电影较为接近。甚至有人认为，可以把影戏看成是有声电影的开山祖。不管这种说法是否恰当，就影戏来说，它肯定是科学应用的产物，是光学应用技术发展的产物。它是将光源、影像和屏幕组合起来，以构成光影艺术的活动。从技术角度来看，电影与影戏的主要区别有两点：电影的画面是投映在银幕上的实像，影戏的画面则是投在屏幕上的阴影；电影的画面是间断的，其连续的视觉影像是靠视觉暂留现象来拼接的，而影戏的画面则是连续的。

"魔镜"——透光镜

透光镜也称透光鉴。其实它并不是透镜，而是一种表面不平（或称为"曲率不同"）的反射镜。但看上去，这种反射镜的正面与普通的铜镜没有什么不同，也可以照人面。它的背面也像铜镜一样，通常是图案和铭文。当反射光束经铜镜反射到屏幕上时，可以清楚地看到背面的图案或铭文（图 1-15）。这也就是"透光"名称的由来。


图 1-15　透光镜（左）和透光镜的像（右）

传世最早的透光镜是珍藏在上海博物馆的四面镜子，据专家鉴定，它们均为西汉遗物。沈括曾对自己收藏的透光镜进行分析，认为镜子的铭文"字极古，莫能读"，估计是先秦之物。当然，也可能是工匠仿古摹刻的字迹。

最早记载透光镜的是隋代的王度，他在《古镜记》一书中有关于古镜的描述。他说道：

> 承日照之，则背上文画，尽入影内，纤毫无失。

从王度的描述看出，人们把这种现象看成一种少见的奇妙现象。当时的透光镜还很少，到了宋代，对透光镜的记述就多了起来（如沈括对他收藏的透光镜的记述）。清代记载的有"双鱼镜""龙凤镜"，郑复光还记载有"双喜镜"。

对于透光镜的研究受到古今一些学者的重视。现有记载的较早的研究是沈括进行的，估计他的同代人（甚至前代人）也有进行研究的，但都没有文字留存下来。

沈括对他收藏的透光镜进行了实验研究，将所观察到的现象进行了描述。他说道：

> 世有透光鉴，鉴皆（背）有铭文，凡二十字，字极古，莫能读。以鉴承日光，则背纹及二十字皆透在屋壁上，了了分明。人有原其理，以为铸时薄处先冷，唯背文上差厚，后冷而铜缩多；文虽在背，而鉴面隐面有迹，所以于光中现。予观之，理诚如是。然予家有三鉴，又见他家所藏皆是一样，文画铭字无纤异者，形制甚古，唯此一样透光；其他鉴虽至薄者，皆莫能透，意古人别自有术。

沈括认为，铸镜时有纹处较厚，冷却较慢，收缩较大；无纹处较薄，冷却较快，收缩较小，于是就造成了镜面的"起伏"。因此，细看上去，"鉴面隐然有迹"。沈括的看法对后世的影响较大。但是，沈括也看到另一种现象：为什么依同法制作的某些铜镜却不"透光"呢？

清代科学家郑复光支持沈括的观点，并且更加清楚地说明，由于铸造时冷却速度不同，铜的收缩程度不同，于是就造成镜面轻微的凹凸不同。郑复光认为，这种“透光”与光从静止水平面映射在墙上的“莹然动”的水光像相同。

与沈括所持观点不同，元代的吾衍提出了另一种说法——“补铸法”。他说：

假如镜背铸作盘龙，亦于镜面窍刻作龙如所状，复以稍浊之铜填补铸入，削平镜面，加铅其上，向日射影，光随其铜之清浊分明暗也。

明末清初的科学家和思想家方以智是支持吾衍的观点的。

在明代，透光镜传入了日本。19世纪，透光镜又经印度传入了欧洲。这种奇妙的“透光”效应，对于外国人来说也是很不可思议的，日本人便称之为“魔镜”。

1844年，法国物理学家阿拉果把一枚透光镜送给法国科学院，引起了欧洲科学界的关注。一些科学家相继对透光镜进行了研究。研究结果表明，沈括和吾衍的观点分别得到一些科学家的支持。

1974年，第14届国际科学史会议在日本东京举行。在会上，日本人展示了他们的研究结果，即这种奇妙的“透光”效应，与会者非常惊讶。1975年，复旦大学和上海博物馆合作研究透光镜，证明沈括的说法是有道理的。经过测定，透光镜“透”花纹处的弯曲程度与别处的确是不同的。

古人对“两小儿辩日”故事的解释

清晨，人们常常可以看到红彤彤的太阳，照在身上暖洋洋的；但到了中午，太阳发出的光就强多了，甚至它发出的光线能灼烧人的皮肤。这种差别所形成的感受在仲夏时节尤为明显。

同一个太阳，在同一天的不同时间看，大小有那么明显的差别，早上的太阳表面积也显得很大，中午时显得较小。这的确是一个很有趣又很难解释的光学问题。这种现象在汉代以前就受到一些人的注意。相传，有两个小孩为这个光学问题而争论，还难倒了来劝解的孔子。列御寇写道：

孔子东游，见两小儿辨斗，问其故。一儿曰：“我以日始出时去人近，而日中时远也。”一儿以日初出远，而日中时近也。一儿曰：“日初出大如车盖，及日中裁如盘盂。此不为远者小而近者大乎？”一儿曰：“日初出沧沧凉凉，及其日中如探汤。此不为近者热而远者凉乎？”孔子不能决也。两小儿笑曰：“孰为汝多知乎？”

这就是著名的“两小儿辩日”的故事。在某种意义讲，它相当于一个悖论，是否可以称为“太阳远近悖论”？

这个“悖论”的大致意思是，早上的太阳“大如车盖”，中午时它又“裁如盘盂”。

依据透视关系可知，对于同一物体来说，距离远时看上去显得小，近时看上去显得大。因此可知早上的太阳离得近，中午的太阳离得远。但是，早上的太阳“沧沧凉凉”，午时它又“如探汤”。依据我们的冷热经验可知，对于同一热源来说，较近时人感觉较热，远时则感觉不到热。据此来判断，早上的太阳离得较远些，中午时离得较近些。

小儿判断日之远近的前提都是真实的。但是，为什么他们得到的结论却是矛盾的呢？这个问题可不一般啊！连孔子都不能给出正确的判断，并且还因此受到两个乳臭未干的小孩儿的嘲笑。

我们知道，“两小儿辩日”涉及光学和热学问题，研究它是很有意义的。

最早对“两小儿辩日”提出解释的是汉代的桓谭，他引用了别人的研究结论，即太阳到达天顶时比处在地平时要远些。东汉的王充（图1-16）认为，日中近于地平之时，可用直角边小于斜边的几何观点加以说明。同时，他还从视觉上加以说明，“日中光明，故小；其出入时光暗，故大。犹昼日察火光小，夜察之火光大也”。看来，王充从背景影响上讲的理由是比较合理的。张衡则认为，昼与夜时日地间距离是不变的。他的理由是，“日之落地，暗其明也。由暗视明，明无所屈，是以望之若大。方其中，天地同明，明还自夺，故望之若小。火当夜扬光，在昼则不明也”。张衡把早晨和中午太阳的变化归于视错觉上，也是有道理的。


图 1-16 王充像

游客眼中的峨眉宝光

峨眉山是中国四大佛教名山之一，山上名寺很多。另外，它的风景秀丽，是旅游胜地。

峨眉山有一个著名的景象——“峨眉宝光”。由于它的宗教色彩，又被称为“金顶祥光”或“峨眉佛光”。古籍中对于它的记述是很多的。

对于峨眉宝光的记述，最为精彩的出现在南宋大文豪范成大（图 1-17）的《吴船录》（卷上）中。范成大于淳熙四年（1177 年）登峨眉后，对峨眉胜景写下了观感和游记。对于峨眉宝光的景象，范成大的记述是：


图 1-17 范成大像

人云佛现悉以午。今已申后，不若归舍，明日复来。逡巡，匆云出岩下旁谷中，即雷洞山也。云行勃勃如队仗，既当岩则少驻。云头现大圆光，杂色之

晕数重，倚立相对，中有水墨影，若仙圣跨象者。一碗茶倾，光没，而其旁复现一光如前，有顷亦没。云中复有金光两道，横射岩腹，人亦谓之“小现”。日暮，云物皆散，四山寂然。

人们告诉范成大，通常佛光再现于中午前后，当时已到下午四五点了，佛光已不可能出现了。可是当他们要回房舍休息时，突然出现很多行云，到雷洞山停下一部分。而云头则显现了“大圆光”，它形成数重彩色的晕，并可以看到其间有一些幻影。一碗茶的功夫，“大圆光”就消失了，其旁却出现同样的光，但也很快就消失了，接着是金光两道。此后，天渐渐黑下来，这种称为“小现”的佛光就消失了。

第二天，范成大又续昨日之游。范成大正在崖殿祈祷之时：

俄氛雾四起，混然一白。僧云：“银色世界也。”有顷，大雨倾注，氛雾辟易。僧云：“洗岩雨也，佛将大现。”兜罗绵云复布岩下，纷郁而上，将至岩数丈辄止，云平如玉地。时雨点有余飞，俯视岩腹，有大圆光，偃卧平云之上，外晕三重，每重有青黄红绿之色。光之正中，虚明凝湛。观者各自见其形，现于虚明之处，毫厘无隐，一如对镜。举于动足，影皆随形，而不见旁人。僧云：“摄身光也”……见佛光欲现，必先布云，所谓“兜罗绵世界”。光相依云而出，其不依则谓之“清现”，极难得。食顷，光渐移过山而西。左顾雷洞山，复出一光如前差小，须臾亦飞过山外，至平野间转徙，得与岩正相值。色状俱变，遂为金桥，大略如吴江垂虹，而两屺各紫云捧之。凡自午至未，云物净尽，谓之“收岩”，独金桥现，至酉后始没。

这一次的佛光持续的时间要长得多，并且先是“大现”，后是极为难得的“清现”。范成大的描述可以说是极详细的，其中对佛光的形成条件也加以论述。这是很可贵的，对今人的研究仍有参考价值。

对于佛光出现的条件，范成大讲，“必先布云，所谓‘兜罗绵世界’。”所谓“兜罗绵”，其中“兜罗”也可写作“妒罗”（梵语），树名。它所生出的絮就称为“兜罗绵”，也意译为“杨华絮”，而“兜罗绵世界”就是云海。由此可见，佛光的出现与一定的气候条件有关。

其实，佛光并非是峨眉独有的奇景，其他地方也有类似的现象。如四川夹江县的伏龟山、峨眉山西面洪雅县的瓦屋山，以及山东泰山、江西庐山、南京北极阁等地，都有类似的大气光象出现。国外也有，如德国布劳肯（Brocken）山的“布劳肯怪影”，就是类似峨眉宝光的现象。

“蓬莱仙境”——海市蜃楼

古代传说中有一个美妙的地方——“蓬莱仙境”，在这里曾经发生过“八仙过

海”。但是，所谓的“蓬莱仙境”是一种奇特的自然现象，常常被称为“海市蜃楼”。据说，西周时期已有专门负责观测“海市蜃楼”的官员。在中国的史书如《史记》《汉书》和《晋书》中就有关于“海市蜃楼”的许多记载。宋代大诗人苏轼曾有诗《登州海市》，云：

东方云海空复空，群山出没月明中。

荡摇浮世生万象，岂有贝阙藏珠宫。

“登州”就是今山东蓬莱。诗的大意是说，海市蜃楼是一种幻象，蜃气只能幻构出宫殿，但并非营建出真的宫殿。

沈括在《梦溪笔谈》中写道：

登州海中时有云气如宫室、台观、城堞、人物、车马、冠盖，历历可见，谓之“海市”。或曰：“蛟蜃之气所为”，疑不然也。

沈括的记载较详细，并且怀疑“蜃气所为”的说法，但他自己也未提出明确的解释。

明代的陈霆认为：“城郭人马之状，疑塘水浩漫时，为阳焰与地气蒸郁，偶尔变幻。”这是说，我们看到的“城郭人马”，是水汽“浩漫”使“地气蒸郁”形成的光象（“变幻”）。

方以智在他的《物理小识》中指出：

海市或以为蜃气，非也。张瑶星曰：“登州镇署后太平楼，其下即海也。楼前对数岛，海市之起，必由于此。”

陈霆和张瑶星的见解是很好的，他们注意到蜃景与附近的庙岛群岛（即今烟台长岛）是有关系的。方以智的学生揭暄为《物理小识》作注时指出：

气映而物见。雾气白涌，即水气上升也。水能照物，故其气清明上升者，亦能照物。

这种“气映”（大气光象）的说法是有道理的。揭暄和游艺（游艺注、揭暄作序《天经或问后集》）认为：

水在涯水涘，倒照人物如镜，水气上升，悬照人物亦入镜。或以为山市海市蜃气，而不知湿气遥映所为。

揭暄和游艺更加明确地利用光学的原理来解释。值得指出的是，他们都还没有认识到光的折射问题。

明代的谈迁还对“海市蜃楼”现象进行搜集，有十余条记录，如“海市”“城郭气”“卤城影”“地镜水影”“水晶宫”等。除了蓬莱，他还记录了其他地方的“海市蜃楼”现象，如山东的济南、汶上、东阿和恩县（治所在今山东平原县），山西的繁峙，河北的钜鹿，安徽的灵璧和霍邱，河南的荥泽（今河南广武县），浙江的海盐等地。

在我国，沙漠中的蜃景记载较少，也许是由于较少见。不过，唐僧玄奘写过自

己的见闻，即：

(在玉门关的“五烽”)孑然孤游沙漠矣。唯望骨聚马粪等渐进，倾间，忽有军众数百队，满沙碛间，乍行乍止，皆裘毼驼马之象，及旌旗槊纛之形，易貌移质，条忽千变。遥瞻极著，渐近而微。法师初睹，谓为贼众，渐近见灭，乃知妖鬼。

玄奘对蜃景的记录是很宝贵的，但当时对其成因尚未知。

对海市蜃楼现象的解释是19世纪的事了。1853年，英国传教士艾约瑟和张福僖合译《光论》，较为系统地介绍了西方光学知识。其中以较大的篇幅介绍了“海市蜃楼”现象，并加以演示。1876年，英国传教士金楷理和赵元益合译的田大里《光学》中也介绍了海市蜃楼的现象。这里的“田大里”现在多译为“丁铎耳”或“廷德耳”，是英国著名的物理学家，是法拉第的同事。

从尖底瓶到欹器

陕西西安有众多的名胜古迹，去西安时到东郊参观著名的半坡遗址博物馆是一个不错的选择。人们一进大门就会看到水池中假山石上的一位少女，她用一只底部尖尖的陶瓶在汲水。人们对这只尖底的陶瓶可能会产生一些疑惑。

半坡遗址的尖底瓶，大者可达70厘米，因此有人就叫它陶罐；又由于它用于汲水或贮水，也就被称为汲水陶罐。它的外形是上部接近半球形，下部接近圆锥形，两侧用于提或拎的两耳位于中间偏下的部位；腹部较粗，颈部较细，瓶口不大。大体上说，瓶体是中间大，一头小，一头尖。由于尖尖的底部很突出，人们就为它起了一个很形象的名字——“尖底瓶”(图1-18)。



图1-18 尖底瓶

为什么半坡人会选用这种形状的陶瓶呢？后人猜测，可能是半坡人对鱼充满了好奇，他们不但把鱼的外形画在陶器上，而且还仿照鱼的形状来制作器皿，尖底瓶就很像鱼儿嘴巴一开一合的样子。用尖底瓶汲水并不容易，当瓶子空着时，由于重心高，稍一摇晃就会歪倒在水面上，尖底就会自动地上翘。但当水流入瓶内时，随着水越流越多，尖底就逐渐沉入水中。这时瓶子的重心就会先向底部移，并随着水面的上升而逐渐上移。灌满水后，瓶子的重心太高，容易倾倒，不能提拎，所以只能抱着走。但是，由于重心高，向别的容器倾倒时就很省劲儿。如果要提拎尖底瓶，灌进的水就不能太多，大约半满就可以了。

半坡人制作的尖底瓶表明当时已认识到灌水多少对操作有影响，说明当时的人们可能对重力和重心已有初步的认识。



图 1-19 孔子与学生一起参观“欹器”

尖底瓶是如此不稳定，人们正好利用这种不稳定性来汲水。后来人们还发明了类似尖底瓶的其他形制的欹器，用来作为测时的装置。

春秋时期的大教育家孔子在教学过程中很注意联系实际，经常带领学生进行实地考察。有一次，他与学生一起到鲁国宗庙中，看到了一种“宥坐之器”(这里的“宥”就是“右”的意思，即“右坐之器”)。“宥坐之器”平常不装水时总是歪着的，于是也被称为“欹器”(图 1-19)，其中“欹”就是“斜”的意思。

这种“宥坐之器”就是放在座子右边的器物，可以装饰，并具有劝诫的意义，意思就是后人所说的“座右铭”。对这个“宥坐之器”，孔子讲解道：

吾闻宥坐之器，虚则欹，中则正，满则覆。

这大意是说，这种“宥坐之器”，空虚时是倾斜的，装到半满时是正立的，装到全满时则会倾覆。孔子还让学生亲自操作一下、演示一番，它果然具有这样的特点。孔子很重视学生的道德教育，于是对此感叹道：“吁！恶有满而不覆者哉！”意思是说，(人)没有自满而不摔倒的。他教导学生要谦虚“中正”，不要自满，自满的人早晚会栽跟头！这也就是古人把“欹器”当作“右坐之器”的原因。

这种“满而自覆”的现象可从力学上说明，即回答物体的状态为什么(不)稳定的问题。当物体未装水、未装满水或装满水时，欹器的重心(质心)位置是不一样的，自然要影响到欹器的稳定状态。春秋时期的欹器所表现出的奇妙现象引起人们的兴趣，一些王宫或宗庙中就摆放它，用于室内的装饰，并提醒人们不要自满。

奇妙的音律

自然界中有许多动听的音响，如风声和流水声、鸟儿和虫儿的鸣叫声……这些就是人们早期模仿的声响。在欣赏这些自然声和人的模仿声时，人们可以体会到声音的和谐之美。久而久之，人们从这些声响中“挑选”出好听的声音、和谐的声音，在演唱时表现出来。

1987 年，考古工作者在位于河南舞阳贾湖的新石器时期的遗址中发掘出一些笛子，它们都是用大鸟的腿骨制成的，所以被称为“骨笛”。人们拣出一支保存完好的“骨笛”，长二十多厘米，上有 7 个音孔(图 1-20)。经过专家的测定，这支

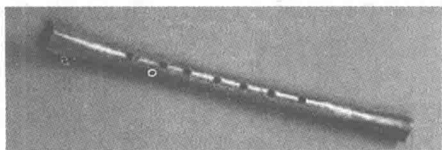


图 1-20 贾湖骨笛

笛子是距今 8 000 年前的古人制作的。由于它没有被损坏,用它试着吹奏,所发出的乐音还是很好听的,竟与今人欣赏的标准是一致的,甚至他们的演奏方法还对今人有所影响呢。

随着对音乐的认识和演奏实践,人们也开始研究音乐中的发声原理,甚至引入了数学知识,用于解决计算弦长和确定笛子音孔位置之类的问题。

古人在劳动的时候,为了提高工作效率,"劲儿往一处使",要一齐喊出节奏很强的号子。在收获的季节,为了感谢上苍的护佑,人们要载歌载舞,庆祝一番。

当然,最初的音乐是很简单的,主要是利用简单的节拍来使舞蹈者的动作保持一致。为了显示节拍,除了用嗓音发出来,还可击掌、跺脚,或击石、击鼓等。在古代的美术作品就表现了舞蹈的情形,如舞蹈纹彩陶盆(图 1-21)。这个陶盆于 1973 年出土于青海大通地区。盆腹内壁上部有彩绘舞蹈纹,舞蹈者分为 3 组,每组 5 人。他(她)们手拉手,有节奏地跨步而舞,表现出一种欢快的气氛和纯真的情趣。这种原始节奏非常和谐,后来的音律知识就起源于这种和谐的节奏之中。



图 1-21　远古时期的载歌载舞

为什么"骨笛"能发出和谐的乐音？还有古代的陶埙和乐钟也可以演奏出和谐的乐音。

在长期的演奏实践中,古人对 5 个基本音最重视,并分别命名为宫、商、角、徵、羽,合为"五音"。大约在 2 000 年前,古人已找到了确定五音的方法。在制作乐器时,首先要确定发"宫"音的弦线长度。假设它的长度为 81,然后分别乘以一个比值,如$\frac{2}{3}$,即与 1 相比要短$\frac{1}{3}$,这样的操作称为"损";或长出$\frac{1}{3}$,这样的操作称为"益"。这样就可以分别得到:108($81\times\frac{4}{3}$)—徵,96—羽($72\times\frac{4}{3}$),81—宫($3\times3\times3\times3$),72($108\times\frac{2}{3}$)—商,64($96\times\frac{2}{3}$)—角。

这种定音方法中,由于乘数的分母为 3,所以称为"三分损益法"。其中"三分"的意思是这个分数的分母为 3。用这些音来演奏,发出的音是比较和谐的。

和谐的乐音与毕达哥拉斯的发现

今天,我们是用音程来表示音与音之间的和谐程度。音程之间的差不是用减法来求的,而是用比值(即除法)来表示的。以宫、商、角、徵、羽为例,可得到一些比值。这些比值可分为几类:3∶2(108∶72、96∶64)、4∶3(108∶81、96∶72)、

9∶8(108∶96、81∶72、72∶64)、16∶15(96∶81)、27∶16(108∶64)、81∶64。这些音程都有专门的名称，如3∶2为纯五度，4∶3为纯四度，9∶8为大全音，16∶15为大半音，27∶16为大六度，81∶64为大三度。具有这样音程的乐音，听起来就和谐。今天我们仍在用这样的方法确定乐音，并且仍要用到这些比例值。

古人是如何找到这种定音方法的，今人已难以知晓，但肯定是经过长期探索后得到的。在西方，据说古希腊著名哲学家和数学家毕达哥拉斯提出了与“三分损益法”相似的方法，但他称之为“五度相生法”。

传说，毕达哥拉斯在埃及旅行时，曾路过一个铁匠铺，听到匠人们敲打铁砧而发出的叮叮当当声，他觉得这些声响非常动听，于是就停下来，认真地研究这些和谐音的发声条件。

经过反复试验，毕达哥拉斯发现，发出不同的声响与铁匠所用的锤子有关。锤子的重量不一样，敲击时发出的声音也不同。经过比较，他发现，当锤子重量的比值为2∶1、3∶2和5∶4时，它们的音程恰为一个八度音、一个五度音和一个四度音。据说，他也像中国古人那样曾用弦线进行试验。

不管是中国人，还是希腊人(甚至可能还有其他地区的人)，通过试验不难发现弦长与音调之间的关系，即弦线越短，音调越高。

通过长期的数学研究和哲学思考，毕达哥拉斯学派的学者认为，宇宙运行应遵循数学的规律，并且体现着一种数学上的和谐关系。该学派的这种思想一直影响并指导着一代又一代的科学家去研究宇宙中的各种事物，力图从中找到那美妙的数学规律。据说，“哲学家”这个词就是毕达哥拉斯创造的。

毕达哥拉斯关于宇宙的构造依赖于数的观点可能来源于他对乐音的研究。他发现和谐音之间的音程呈简单整数比的关系，他发现的勾股定理表明图形也具有一种与整数有关的简单比例关系。

在长期的音乐实践中，人们发现，三分损益法或五度相生法并不是产生乐音的最好办法，人们又经过一千多年的研究才找到更好的方法，即“十二平均律”。这种产生乐音的办法不但简单，而且用这些乐音演奏更和谐。最先找到这种方法的是中国人，即明朝的科学家朱载堉(图1-22)。今天，许多场合都要使用十二平均律来指导演奏或演唱。



图1-22　朱载堉的墓地

朱载堉一生潜心于科学与艺术，研究过律学、舞学和历法学。他将数学、声

学、音乐学结合起来，大胆改革三分损益法，提出十二平均律，为现代音乐的发展打下了科学的基础。

墨子及墨家学派的科学成就

墨子（图 1-23）是战国初期的人物。他名叫墨翟，是滕国（位于今山东滕州市）人，大约生活在公元前 468 到前 376 年间。墨子是木匠出身，但他熟习古代的典籍，积极参加政治活动，当过小官。他在机械制造上有所创新，技术上与当时的公输般（又名鲁班）齐名。此外，他对数学和物理学的问题也多有研究，取得了许多成就。他也非常重视教育，招收学生，讲学著文，并形成了一个与孔子开创的儒家齐名的学派——墨家。作为墨家学派创始人，墨翟也就被人们尊称为墨子。



图 1-23　墨子像

墨子和他创立的墨家学派鲜明地提出了“兼爱”“非攻”“尚贤”“尚同”“天志”和“明鬼”等主张。墨子的一些发明对军事技术的发展有很大的作用，但墨子的理想还是社会的安宁与和平，人人互助互爱，不管出身如何，在管理国家上能够选贤任能，国与国之间有了矛盾不要轻易动武或以武力相威胁。这就是“非攻”的思想。

在物理学上，墨子讨论了时间与空间、运动与静止、时间与路程，提出了类似原子（“端”）的观点和“物质不灭”的科学观点。

对于力学研究，墨子提出了力的定义，详细地论述了杠杆平衡和不平衡的情况，分析了滑轮和斜面的受力情况，对浮体进行了描述。

《墨经》中对“落体运动”也有研究，即“凡重，上弗挈，下弗收，旁弗劫，则下直”。这就是说，凡是重物，若不从上面提举它，不从下面捧托它，也不从旁边强迫它，则（物体一定）竖直下落。由这句话可见，墨家已认识到，落体运动是有条件的——“上弗挈，下弗收，旁弗劫”。

对于光学研究，墨子的研究主要是分析几何光学的问题，像物体与影子的关系、重影问题、小孔成像的实验研究，以及平面镜、凹面镜和凸面镜的成像问题。

墨子的研究对他的发明活动具有重要的作用。例如，墨子的木工技术精良，他发明了一种木鸟，这种木鸟虽然并不成功，但作为最早的飞行器研制还是很有历史价值的，并且对后世风筝的发明具有启发意义。

墨子发明了利用声音确定声源的技术，这一技术由于在军事上的应用价值，被后世军事技术专家不断发展，成为一种重要的“地听”技术。

墨家与名家之间的争论

春秋战国是一个“百家争鸣”的时代，一些著名的学派之间进行了长时间的争论。在科学技术研究中，以墨家和名家的争论最有代表性。他们在一些科学技术问题上都亮出了各自的观点。

名家的代表人物是公孙龙和惠施。公孙龙在逻辑学的研究上贡献非常大，他提出了一些看似非常“可笑”的论点，如“鸡三足”和“卵（如鸡蛋）有毛”。惠施也提出著名的观点：“至小无内，谓之小一；至大无外，谓之大一”，对中国古代的科学和哲学发展产生了极大的影响。

名家学者还提出两个著名的观点——“发引千钧”和“飞矢不动”。

在战国时期，杠杆的研究受到了许多专家的重视，甚至还引起了一些争论。《墨经》中记载了一个独特的杠杆实验：

> 均之，绝否，说在所均。

这是讲，用人力拉扯一束头发丝。被拉扯的头发丝受到的力应该均匀（“均之”），这束头发丝断绝与否（“绝否”）取决于受到的力是否均匀。并且，如果用头发丝来拉扯杠杆的轻臂端，即使重臂端悬挂较轻的物体，头发丝也会断绝。若延长轻臂（或缩短重臂），使杠杆均衡，再拉扯头发丝，头发丝就不会断绝了。

从墨家的实验中可以看出，用一根头发来拉扯杠杆，是可以提升（“引”）千钧重物的，关键是要使杠杆平衡。不过，赵国的公孙龙在此基础上设计了一个科学的论题，即：

> 发引千钧。

魏国公子魏牟对此解释道：

> 发引千钧，势至等也。

魏牟指出，发引千钧的条件是力矩（“势”）平衡（“至等”）。

在后来的衍变过程中，这个结论被逐渐夸大成“千钧一发”了。

声音的妙用

中国古代修建了一些具有声效应的建筑，如消声建筑（瓮墙）、扩声建筑（舞台和戏台）和回声建筑。回声建筑中最有名的是并称“中国古代四大声学建筑”的“石琴”（在重庆潼南县大佛寺），“蛤蟆音塔”（河南三门峡市宝轮寺的三圣舍利宝塔），“莺莺塔”（在山西永济普救寺），北京天坛圜丘天心石、回音壁、三音石和皇穹宇对话石。

重庆潼南的大佛寺建于明宣德年间（1426 年）。在寺的一侧有一座“回音”建

筑，名为“石琴”，系一排四十二级石梯摩崖而凿，从江岸排到山顶。当行人走在这些石梯的台阶上，脚下就会发出一些美妙的声音，古人摩崖题名曰“石磴琴声”。其中有7级石阶还能踏出高低不同的音调来，故又名“七步弹琴”。


图1-24 “莺莺塔”

在山西永济市，有一座名寺，叫普救寺。喜欢听戏的人大都知道《西厢记》，讲的是崔莺莺和张生的故事，这个故事就发生在普救寺内。普救寺中有一座名塔，由于崔莺莺的名气很大，人们就把这座塔称为“莺莺塔”（图1-24）。“莺莺塔”不止扬名于戏曲中，它那奇妙的回声效应也更加扩大了它的名气。

“莺莺塔”的声音效应大致可分为三种：

当距塔10 m处击掌或击石时，击掌处听不到回声，而在距塔30 m外能听到它的回声，并且回声好像是从砖塔上空传出来似的。

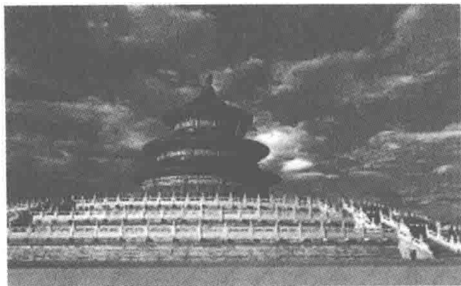
在距塔15 m处击掌，听到的声音好像从塔底传出。

在距塔20 m处击掌，可以听到从塔上空传来的声音，而且可以在一个较大的范围听到回声，这差不多是塔前4 m到100 m的范围。

此外，在塔前一侧击掌，在另一侧的对称位置也能清楚地听到声音，别的地方则听不到。而距塔2.5 km外的村庄里发出的锣鼓声和歌声在塔下亦可听到，远处村民的说话声也可被塔聚敛放大。

这些效应的原因是，塔内部中空，相当于一个声音的放大器，可以将声音放大；塔外檐整体形成一内凹的弧形，有利于声波的会聚，并且每层塔檐的圆弧状按一定比例收缩，使声波可以会聚到一定的区域。因为有这样的塔内构造和塔外形状，才有如此奇妙的声学效应。

皇帝祭天时的“扩声器”


图1-25 祈年殿

天坛中最精美的建筑是祈年殿（图1-25）。祈年殿建在一个三层石台基上，墙体为圆形，上覆三层檐，顶铺蓝色琉璃瓦，象征“蓝天”。

祈年殿是一座无梁殿，因此柱子较多，并且有一些象征意义。由于不用梁，三重檐要用三圈柱子支撑，其中外

圈有 12 根柱子(象征 12 时辰),中圈也有 12 根柱子(象征 12 月),外圈与中圈共 24 根柱子(象征二十四节气)。内圈还有四根柱子(象征四季),一共有 28 根柱子(象征二十八宿)。柱顶还有八根“童柱”,总共有 36 根柱子(象征三十六天罡)。这些都与“天时”有密切联系。

祈年殿矗立高耸,与扁平的圜丘形成了鲜明的对比。

1. **圜丘**

圜丘位于皇穹宇的南面,是一个三层的圆形石台,最高层离地面约 5 m,半径 11.9 m,每层圆台周围有石柱栏杆。

站在圜丘中心的石板(“天心石”)上讲话,觉得自己的话音好像是扩大了。经过测试发现,从“天心石”发出的声音,由于石栏杆和(石)地面的反射作用,在“天心石”上可以接收到三个回波(但第三个回波很弱,可以忽略不计,图 1-26),其中两个回波经过与原声混合后,可以声音变得更加浑厚和悦耳,强度也加大了。

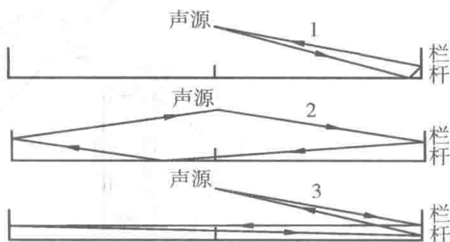


图 1-26 圜丘的回声原理示意图

2. **回音壁**

皇穹宇(图 1-27)由一道圆形围墙围护起来,这道围墙就是回音壁,其高约 6 m,直径为 65 m。在皇穹宇的北边是供奉牌位的主殿,主殿与围墙之间的最短距离为 2.5 m。整个围墙的表面非常光滑,是很理想的声音反射体。当处于某位置的人贴近围墙小声说话,声音就会沿回音壁传至位于另一位置的人耳处。由于主殿的遮挡,声波沿回音壁传播受到一定的限制,即当声波与围墙切线的交角小于 22°时,声音可沿回音壁次第反射到另一处;如果交角大于 22°,声音就会被主殿的外墙面散射。



图 1-27 皇穹宇

3. **三音石**

皇穹宇内还有一些声效应,这是由于声音与回音壁和东西配殿相互作用的结果。从皇穹宇的主殿出来,下台阶,踏上甬路数到第三块石板,站在上面拍手,可

以听到三次回声，这块石板就称为“三音石”。三音石恰好位于圆形围墙的中心(即圆心位置)，圆形围墙的半径为 32.5 m。

具体来讲，当击掌的原声传至东西配殿后再返回到“三音石”，这就是人们听到的第一个回声。当击掌的原声传至回音壁，再从回音壁返回到三音石，人们就听到了第二个回声。而第二个回声再次到达回音壁后反射到“三音石”，人们就听到第三个回声(图 1-28)。

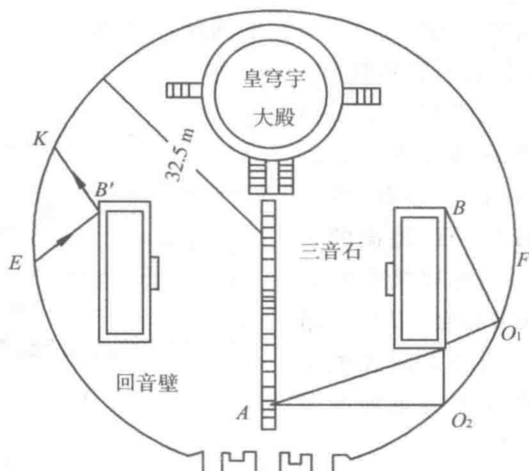


图 1-28　三音石和对话石的回声示意图

在现场的测试表明，在踏上甬路的第一块石板上人们击掌，可以听到一次回声(“一音石”)；踏在第二块石板上，可以听到两次回声(“二音石”)；踏在第四块石板上击掌，可以听到四次回声(是否可以命名为“四音石”?)，踏在第五块石板上击掌，可以听到三次回声(说明它是第二块“三音石”)。

4. **对话石**

对话石是皇穹宇的台阶前甬路上的第 18 块石板(图 1-28 中的 A 处)。当站在这块石板上面轻声说话时，站在东配殿东北角(图 1-28 中的 B 处)的人可以清楚地听到其说话声。其实他们两人彼此是看不见的，并且二者相距 36 m。由于东西配殿是对称分布的，在西配殿的西北角(B')也能听到 A 处的说话声。实验表明，从对话石上发出的声音是经过回音壁反射至 B 点的，并且只有到达 O_1—O_2 之间的声音才能到达 B，即声波经过回音壁“有效墙壁”(O_1—O_2)的反射和会聚到 B 点的。这是 1994 年新发现的一种光学效应。

由于上述这些声学效应，古代皇帝更加觉得上天的神秘，并且更加增加了祭天时的庄重感。

有趣的鱼洗


图 1-29　正在操作鱼洗

鱼洗是一种铜盆，它有两耳，盆底铸刻鱼纹或龙纹，因此被称为鱼洗或龙洗。将水注入盆内，用两手搓两耳，水面就会喷射出水柱，高者可达 60 cm 以上，水面处还会出现驻波纹（图 1-29）。这时，水面“波涛汹涌”，鱼跃不止，有很好的观赏效果。

鱼洗的振动是一种壳振动，而且是较为规则的圆壳振动。用手掌摩擦鱼洗的两耳产生振动时，可将能量传至盆壁。壁的振动是横向的振动，平行于水面，并不断作用于水面，使水面发生相应的振动，形成这种和谐的振动产生的次谐波。鱼洗振动的波腹处，水的振动最强烈，甚至产生喷水的现象，并且在水面形成驻波。在波节处，水不发生振动。这样，水珠、水花和气泡就固定停留在水面上。这使得水面上的节线清楚地显现出来，也就将这种壳振动显现出来。此外，从铸造技术的角度来看，铸造铜制的鱼洗还需要精密的技术。没有这种技术，要想从盆底刻的“鱼嘴”喷出水柱也是不可能的。

石钟山因何定名?

在自然界也有一些能产生奇妙声响的山水景观。《水经》一书中就有对山石鸣响的记载，如对鄱阳湖出口处“石钟山”的记载。为什么山名“石钟”呢？各种传说，莫衷一是。当地人说，他们是以山的形状来定名；一些文人来此探访时，则对发出的声响（定名）感兴趣。但是，从以声响的定名者来说，他们的论说也不一样。北魏郦道元曾对《水经》作注，名《水经注》。《水经注》中在论说石钟山时认为，石钟山是“下临深潭，微风鼓浪，水石相搏，响若洪钟”。郦道元强调，水击山石，发出声响，并且“响若洪钟”。后来，曾任唐朝江州刺史的李渤在此地考察过一番。他自己说，他是在此地垂钓的时候，在山上“忽遇双石，潄枕潭际，影沦波中”，即双石倾斜（“潄”）在岸边，在水波中倒映（“沦”）。他“扣而聆之，南声函胡，北音清越，枹止响腾余歇”。他认为，这双石因石质不同而发出不同的声响。大体上，南边的石头发出的声音有些“闷”（“函胡”，即含糊），北边的石头发出的声音则有些“脆”（“清越”）。

对于声音的特质，李渤的结论较为草率。他还认为，潭水润泽山石，山石因此蕴含着“英”气，这些气质凝聚，发出“至灵”的气及优美的声响。最后，李渤还着重

指出，如果不是这样，“安能产兹奇石子”？这样，李渤自认为“山乃石名”！

宋朝元丰七年（1084 年），大文学家苏轼送长子苏迈到江西德兴县赴任，途经湖口，也登临石钟山赏玩一番。他并不认同郦道元和李渤的说法，决定亲自去实地考察，搞清楚“石钟”声音的由来。月明之夜，他与苏迈一起乘坐小船，行进在绝壁深潭之间，进行考察。他们发现，在绝壁之下“多穴罅”，水从这些狭缝流进流出，水流的冲击产生了“镗鞳”的声响。他自认为已解开这个谜团，并且找到了石钟山发出“声响”的缘由。为此，苏轼还写出《石钟山记》。在文章中，他批评郦道元的考察过于草率，讥笑李渤的研究过于简单。其实，苏轼的结论也有一些不妥。

到明清，又有人出于对“石钟山”的好奇而去实地考察。明代的罗洪先和清代的彭雪琴对苏轼的看法提出批评，认为苏轼是“过其门而未入其室”，导致研究的结果并不准确。罗洪先和彭雪琴也先后对石钟山进行过仔细的考察，深入探寻。他们先后发现，苏轼“六月访山，适逢水涨，未见全”，而罗洪先和彭雪琴都是在冬春季节到达石钟山的。这时正值江水下落，山石裸露出来。在认真考究之后，他们发现，石钟山发出“声响”的真正原因是，“盖全山皆空，如钟覆地，故得钟名”。这样，石钟山以山形定名还是以发声定名的谜团终于解开了。

钟的奥妙

壳体振动是一种板式振动，壳体振动的典型应用之一是编钟。编钟是中国古代一种重要的乐器。陶钟和木钟的制作年代十分久远，距今应有 3 000 年的历史了。铜制的钟起源于商代的铜铃，铜钟与铜铃的外形很相似，但钟的形体要大得多，商代最大的铜钟已达 109 kg。从出土的西周编钟来看，当时的铸钟技术已经达到很高的水平。陕西长安和扶风出土的编钟，外形美观，比例匀称。特别是山西侯马上马村出土的一组春秋中叶的编钟（9 件），其音阶的设置同《管子·地员》中的讲述完全一样。而河南信阳出土的楚国编钟（13 件），其音阶跨两个八度，这组编钟制作的年代当在春秋末年或战国初年；湖北随县（今随州市）曾侯乙墓出土的战国时期的编钟，制作于楚惠王五十六年（公元前 433 年）。曾侯乙编钟共 64 件，并有 1 件镈钟。最大的重 203.6 kg，总高 1.53 m；最小的重 2.4 kg，总高 20 cm。编钟总重在 25 000 kg 以上。

编钟的“口形”是扁的，故也称为“扁钟”。沈括指出这一特征时说，“古乐钟皆扁如合瓦盖”。编钟的上部为“钲”，下部为“鼓”。撞击鼓部，即可发出乐音。每个乐钟可以发出两个音，这是中国音乐家吕骥和音乐史家黄翔鹏等人于 20 世纪 70 年代中期发现的。因此，这种乐钟也被称为“双音钟”。双音钟的发音部位在鼓部的正中位置（有两个）和鼓部的旁侧位置（有四个），撞击时发出的音分别被称

为"中鼓音"和"旁鼓音"(或"侧鼓音")。双音钟大概起源于公元前14—前13世纪。20世纪80年代,中国科学院声学研究所科研人员陈通和郑大瑞对古代乐钟进行了实验研究,发现了编钟发声的振动规律,首次揭示了双音钟发声的声学之谜。

对于钟的形状对发声的影响,古人是经过了长期的摸索后才搞清楚的。《周礼》一书对钟的各种形状对发声的影响进行了总结性的论述,具体讲到乐钟的12种形状对其发声的影响。这12种情况分别是:钟的上部口径太大,则声音在钟内回旋而不出(图1-30甲);钟的上下口径相当,则声音缓慢地荡漾出来(图1-30乙);钟的下部口径太大,则声音很快地冲出,没有荡漾的余音效果(图1-30丙);钟的一边往外偏斜,声音离散不正(图1-30丁);钟的一边往里偏斜,声音外扬不畅(图1-30戊);钟体大,声音洪亮(图1-30已);钟体小,声音发哑(图1-30庚);钟体圆,有较长的延长音(图1-30辛);钟口偏大,声音发扎,有喧哗之感(图1-30壬);钟口偏小,声音抑郁不出(图1-30癸);钟壁太薄,声音颤抖分散(图1-30子);钟壁太厚,声同击石(图1-30丑)。

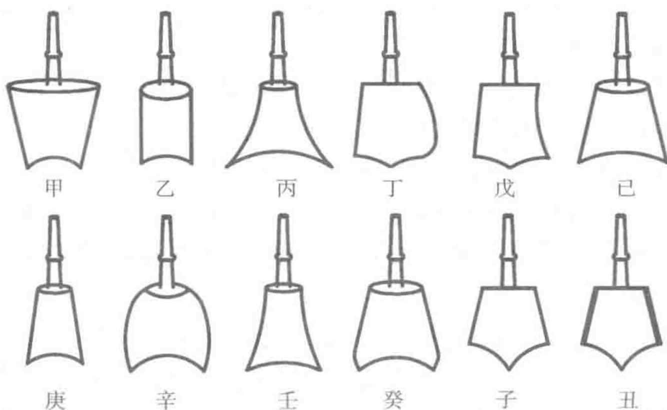


图1-30 《周礼》中论述钟的12种形状

对这12种钟形对应的乐音效果,古人通过大量的经验积累和大量的实验才搞清楚,古人特别注意到圆形钟的特点,即有较长的延长音。

到春秋战国时期,对乐钟的研究更加深入。编钟的制作在《考工记》中有详细的记载。人们不仅注意到青铜合金的配比,而且对钟形各部分的比例也做了严格的规定,以保证满足对钟声的要求。

对于合金配比,《考工记》中记载:

六分其金,而锡居一,谓之钟鼎之齐。

从先秦时期铜钟成分分析来看，它们的锡含量差不多是在$\frac{1}{7}$至$\frac{1}{6}$之间。

对于钟形，书中指出：

薄厚之所振动，清浊之所由出，侈弇之所由兴，有说。钟已厚则石，已薄则播，侈则柞，弇则郁，长甬则震。……钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。

大意是，钟壳体的厚薄影响声音的频率（“清浊”），钟口的侈大和窄狭对声音的频率也有影响。钟壁过厚，声音发闷（“石”），强度较低；钟壁太薄，声强较高（“播”），传之较远。钟口太大（“侈”），产生的声音强度较大，频率较低时，声音传之较远。钟口太小，则郁闷不出。钟柄（“甬”）太长可使振幅过大，对钟壳体的振动产生干扰（“震”）。若钟大而短，则发声急促，易衰减，传播不远；若钟小而长，则发声舒缓，传播悠远而长久。

对于调音的技术，《考工记》中讲道：

为遂，六分其厚，以其一为之深，而圜之。

隧（“遂”）的部位要适当加厚，用以调音。出土的一些编钟内壁上有刮削和水磨的痕迹，可以表明这一点。

由此可见，《考工记》中关于制钟技术的记述是非常科学的。这也是世界上第一部关于制钟声学技术的论著，具有很高的价值。

沈括对古乐钟发声问题也有一些研究。他认为：

古乐钟皆扁如(合)瓦盖，盖钟圆则声长，扁则声短，声短则节，声长则曲，节短处声皆相乱，不成音律。后人不知此意，悉为扁钟，急叩之多晃晃尔，清浊不复可辨。

在沈括的这些话中，“节”就是发音短促，“曲”是发音延长，“节短”是演奏快。大意是，圆钟作为编钟来演奏是不合宜的，因为节奏快时会发生前后音相混，“不成音律”；扁钟则没有这个问题，它作为编钟演奏快节奏的乐曲时不会发生前后相混的情况。

今人从声学角度的研究表明，圆钟振动使振动持续性和在钟口的空气迂回作用都比其他形状的钟振动要强得多。因此，演奏快节奏的曲目，声波相互干扰（“多晃晃尔”）。中国人很早就注意到这一点，如曾侯乙墓出土的编钟就是扁形的。

圆钟作为乐钟并不适宜，但可用在寺庙，如明永乐年间铸造的“万钧钟”（或称为“永乐大钟”，现存北京大钟寺）就是一例。每年除夕时，敲击这口大钟，可传声很远且持久。

共振的故事

在唐代，洛阳有个和尚碰到一件怪事。在他的房中挂着一个磬，令他感到奇怪的是，他经常听到这个磬自动发声。和尚很害怕，找有法术的人“施法”来禁绝磬的无故自鸣，但不能奏效，因此得了病。乐师曹绍夔是和尚的朋友，听说和尚生病了，就来看望他。和尚就把这个怪事告诉了曹绍夔。正在这时，庙内的钟响了，磬也开始“自鸣”。曹绍夔明白了，笑着对和尚说：“明天你安排一顿美餐，我来帮你驱除妖怪吧！”和尚并不完全相信，但仍抱着一线希望，于是就应承了下来。

第二天，曹绍夔来到庙里，与和尚一起享用了丰盛的斋饭。吃完饭后，曹绍夔从袖中抽出一把锉刀，在磬上锉了几下，后来磬就不再“自鸣”了。和尚问曹绍夔是什么原因，曹绍夔说：“这个磬和前殿的钟鸣可以呼应，敲钟时这个磬就相应鸣响起来。”和尚听得似懂非懂，但还是很高兴，因为他的磬不再无故鸣响，他的病也好了。

这是一个曹绍夔消除共振的故事，在唐代还有另一个关于共振的故事。

太常丞宋沇一日早于光宅佛寺待漏，闻塔上风铎声，倾听久之。朝回，复至寺舍，问寺主僧曰：“上人塔上铎，皆知所自乎？”曰：“不能知。”曰：“其间有一是古制，某请一登塔，循金索，试历扣以辨之，可乎？”僧初难后许，乃扣而辨焉。寺众即言：“往往无风自摇，洋洋有闻，非此也耶？”曰：“是耳，必因祠祭，考本悬钟而应也。”固求摘取而观之，曰：“此姑洗之编钟耳，请且独缀于僧庭。”归太常，令乐工与僧同临之，约其时彼扣本乐悬，此果应之，遂购而获焉。

这段话，近乎白话，且文意浅显，就不一一译出了。

在宋代，沈括曾在一友人的家中看到一种共振的现象。他的友人家有一个琵琶，放在一间空屋子中。用一种叫“管色”的乐器奏“双调”（一种曲调的名称），这时琵琶的弦上立刻就有声音发出来，与“管色”发出的乐音相应之，但演奏别的调子则不会相应。沈括的朋友以为这个琵琶是一种极少见的东西，当宝贝收藏起来。沈括并不这样认为，其实这包含着极其简单的道理：只要“管色”演奏一种音调，在琵琶上也可以演奏这样的音调，那一定是“可以”相应的。


图 1-31　沈括进行共振实验

为了进一步研究这种现象，沈括设计了一个实验，即使琴、瑟的弦发生“相应”（即共振），为了清楚地看到琴弦与瑟弦之间的共振现象，沈括还用“纸人”来演示其“相应”的情形（图 1-31）。因此，沈括的实验是

世界上第一个可以演示的弦线共振实验。西方类似的实验是在 17 世纪完成的。

伟大的发明——司南和指南针

我们大都见过指南针。它是一种磁针，指向是自动的，是因为受到地球磁场作用的结果。我国古代还有一种指南车(图 1-32)。指南车是一种可以"自动"指示方向的车，它是通过一种机械作用完成指向的，其复杂程度远胜指南针。

借助磁性的指向装置是在战国时期发明的，它的名字叫"司南"(图 1-33)。东汉王充在《论衡》一书中有关于司南的记录。他的记述很简单："司南之杓，投之于地，其柢指南"。根据王充的记载可知，司南是勺(即"杓")形的，放在一个有刻度的"地盘"上，勺把("柢")就会指向南方，借助地盘可以将方向明确地指示出来。

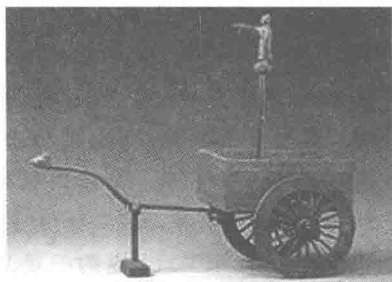


图 1-32　指南车(复原图)



图 1-33　司南

尽管司南可以指示方向，但由于勺子的形体较大，与地盘之间的摩擦较大，显示的精度不够高。因此，古人就继续研制新型的磁性指向装置。

在研制新的磁性指向装置时，人们对物质磁性的认识和物体的磁化方法都有了很大的进步。人们发现，将钢针在磁石上反复摩擦，可以使原本无磁性的钢针获得磁性；又由于磁针轻巧，用它来指示方向更方便和实用。久而久之，司南就被废弃不用了，代之的是轻便的针形磁性指向装置，古人又简称其为"指南针"。

由于指南针方便又实用，很快就被应用在许多行业。首先，航海时要在茫茫的大海上辨清方向，指南针发挥了重要的作用。宋朝时，在船上专设"针房"，由专人负责确定航船的方位。其次，人们确定宅基地和墓地时，要确定其方位和朝向，也要用指南针。

指南针的应用价值很大，北宋大科学家沈括对当时流行的指南针用法进行了概括。关于指南针的用法，沈括记载了 4 种不同的装置：将磁针穿在几根草秆上，

磁针就能漂浮在水面上（“水浮法”，图 1-34 甲）；直接将磁针放在一些光滑的表面，如放在指甲表面（“指甲旋定法”，图 1-34 乙）或放在碗沿的釉面上（“碗唇旋定法”，图 1-34 丙）；用细丝线系于磁针的腰部，在无风处悬挂起来（“缕悬法”，图 1-34 丁）。

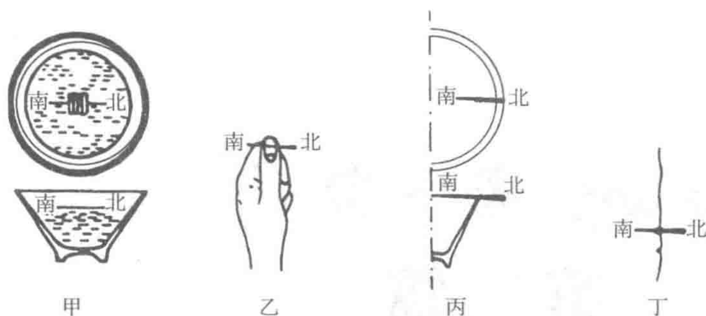


图 1-34　指南针的四种用法

在位于江西临川的南宋古墓中曾出土了一个名为“张仙人”的陶俑（图 1-35）。陶俑造型生动，“张仙人”的右手持有罗盘。这个罗盘是现存最古老的罗盘实物。



图 1-35　“张仙人”（陶）俑

第二篇

近代物理学

我们学习物理学，一般都是从研究物体的运动开始的，习惯上，总是把这部分内容称为力学。不错，在物理学的发展历史上，人们也是首先在这个领域开始新的研究时代的。16世纪到17世纪，是自然科学蓬勃发展的时代，而其中占主导地位的，正是以天体和地面上物体的机械运动为研究对象的经典力学。那么，是谁开创了这个物理学发展的新时代？是谁将新的研究方法引入物理学问题研究中？顺着历史的足迹，我们去认识这些伟人们，正是他们为今天我们的研究提供一个坚实的基础。

一、力学



伽利略

伽利略·伽利莱(西方人名字在前,姓氏在后,习惯上都是以姓氏介绍,比如牛顿和汤姆孙,不过,伽利略却是以名字代替此人。1564—1642),意大利的物理学家和天文学家,近代物理学的奠基人之一,算得上是开创物理学新时代的第一位伟人了。



图 2-1　伽利略像

1564 年 2 月 15 日,伽利略在比萨降生,他的父亲芬琴齐奥·伽利莱精通音乐理论和声学。1574 年,也就是伽利略 10 岁的时候,他们全家搬到了佛罗伦萨。佛罗伦萨是著名的世界艺术之都,是当时欧洲的文化中心、欧洲文艺复兴运动的发祥地、歌剧的诞生地。在这里,伽利略受到了很好的文化熏陶,打下了良好的科学与文化基础。

17 岁的时候,在父亲的要求下,伽利略进入比萨大学学医,但他对学医一点儿兴趣也没有,反而对欧几里得几何学和阿基米德静力学产生了浓厚的兴趣。1583 年,一个偶然的机会,比萨大教堂(图 2-2)里的一盏悬灯吸引了他的注意。当时,他借助于自己的脉搏,发现这个悬灯的摆动居然具有等时性的特点。回家之后,他便用线悬铜球做了一个模拟(单摆)实验,通过这个实验他确证了微小摆动的等时性以及摆长对周期的影响,由此发明了脉搏计,用来测量较短的时间间隔。

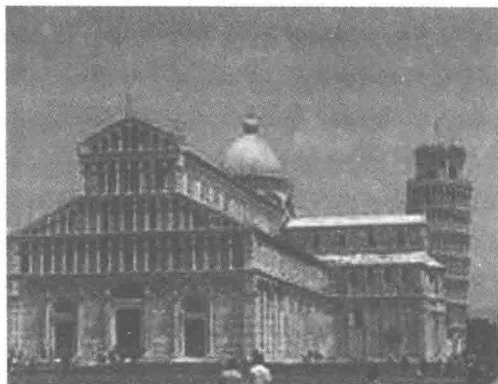


图 2-2　比萨大教堂

1585年，因经济问题，伽利略不得不退学去担任家庭教师，赚钱补贴家用，但他仍然在坚持刻苦自学。1586年，他发明了浮力天平，并写出论文《小天平》。1591年写出了长篇论文《论运动》，提出了描述质点位置的问题，还研究时间和空间的概念。1609年，他制成了放大率为32倍的望远镜，并第一个把望远镜指向天空。1632年出版了他的名著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（简称《两大世界体系的对话》或《对话》，图2-3），并且因此再次受到宗教法庭的审判并被判监禁。1638年在荷兰出版了《关于两种新科学的对话与数学证明对话集》（简称《两种新科学的对话》），系统地总结了他的研究成果。1642年，伽利略离开了人间。

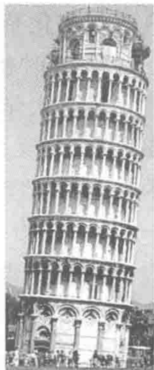


图2-3 伽利略《对话》中译本封面

伽利略的落体实验

在经典力学的奠基方面，伽利略最主要的贡献就是他的运动理论。他将运动分成了匀速运动和变速运动两类，在当时这可是一种新的运动分类方法。就是这么一件看起来十分简单的事情，却大大地推动了运动理论的发展。

伽利略研究的重点自然是在变速运动方面。为了更好地弄清楚变速运动的规律，他将目光集中到了落体运动方面。之所以要研究落体的运动，是因为在历史上包括亚里士多德在内的一批人士对此有过研究，并大体得出结论：物体下落的速度与其重量成正比。也就是说，重的物体比轻的物体下落得快。很显然，亚里士多德关于重物下落速度快的结论与实际经验是不符的。


图2-4 比萨斜塔

历史上有着一段美丽的传说，说的是伽利略在意大利比萨斜塔（图2-4）通过实验推翻了亚里士多德的落体理论。我们不必过于计较伽利略到底有没有在比萨斜塔做过实验，这个传说或者说这个实验其实是想说明伽利略在研究物理问题时所持的态度以及他敢于挑战权威的勇气。领悟到这些，对于我们来说就足够了！

事实上，伽利略对落体问题的研究真的是非常重视的，他的确设计了一个非常著名的思想实验，或者说是逻辑推理。

伽利略提出，如果亚里士多德关于落体的学说是正确的，即物体的下落速度

与其重量成正比,重物的下落速度比轻物快。依据这个理论,可以设计这样一个实验:设有甲、乙两物体,甲物比乙物重得多。依照亚里士多德的观点,甲物下落的速度比乙要快。如果把甲、乙两物捆在一块,若仍按照亚里士多德的观点,甲、乙两物的捆绑体比甲物或乙物都重,所以它下落的速度比甲物和乙物单独下落时都要快;但由于乙物比甲物下落得慢,因乙物的"拖累",甲、乙捆绑体的下落速度应当比甲物单独下落时慢,而比乙物单独下落时快。这两个结论在逻辑推理上都正确无误,但却相互矛盾。这只能说明推理的前提存在问题。也就是说,利用亚里士多德的观点进行的推理会导致荒谬的结论。

伽利略相信,自由落体运动是一种匀加速运动,不过要想证明这一点,就必须通过实验获得下落物体速度的增加与下落时间成正比的数据。由于落体运动太快,直接测量自由落体运动的速度是很不容易的。

值得庆幸的是,伽利略的数学功底是很不错的,这帮了他的大忙。他从数学的角度推理,如果落体运动是匀加速的,那么整个的下落时间与下落距离之间也应有某种关系,而测量整个的下落时间和下落距离应该是比较容易的。在经过一系列的运算之后,他找到了"$s \propto t^2$"这个关系式。

但是,物体自由下落时还是运动得太快,在下落时间的测量方面还有着不小的难度。所以,为了数据精确,伽利略进一步想到了用物体的斜面运动来代替直接的自由落体运动,因为他通过证明知道,斜面运动和自由落体运动具有相似的性质。于是,伽利略进行了著名的斜面实验(图 2-5)。他在《两种新科学的对话》中对这个实验描述得十分具体,他写道:


图 2-5　伽利略的斜面实验

取长约 12 库比(1 库比=45.7 cm)、宽约半库比,厚约三指的木板,在边缘上刻一条一指多宽的槽,槽非常平直,经过打磨,在直槽上贴羊皮纸,尽可能使之平滑,然后让一个非常圆的、硬的光滑黄铜球沿槽滚下,我们将木板的一头抬高一二库比,使之略呈倾斜,再让铜球滚下,用下述方法记录滚下所需时间。我们不止一次重复这一实验,使两次观测的时间相差不致超过脉搏的十分之一。在完成这一步骤并确证其可靠性之后,就让铜球滚下全程的四分之一,并测出下降时间,我们发现它刚好是滚下全程所需时间的一半。接着我们对其他距离进行实验,用滚下全程所用时间与滚下一半距离、三分之二距离、四分之三距离或任何部分距离所用时间进行比较。这样的实验重复了整整一百次,我们往往发现,经过的空间距离恒与所用时间的平方成正比

例。这对于平面(也即铜球下滚的槽)的各种斜度都成立。我们也观测到,对于不同的斜度,下降的时间互相间的关系正如作者预计并证明过的比例一样。

为了测量时间,我们把一只盛水的大容器置于高处,在容器底部焊上一根口径很细的管子,用小杯子收集每次下降时由细管流出的水,不管是全程还是全程的一部分,都可收集到。然后用极精密的天平称水的重量,这些水重之差和比值就给出时间之差和比值。精确度如此之高,以至于重复许多遍,结果都没有明显的差别。

这个实验设计得何等巧妙啊!借助于这个完美的斜面实验,伽利略还进一步推想出惯性原理。这个推想的思想精髓后来就被包含在牛顿的惯性定律中了。

对于开创物理学新的时代,伽利略的功劳主要在于他将实验真正地引入物理问题的研究之中,奠定了一种科学的物理问题研究方法。不仅如此,伽利略的实验还是多方位的,包括了实实在在的实验和存在于头脑中的以逻辑推理为基础的思想实验。

"天空立法者"——开普勒

开普勒(1571—1630,图 2-6),德国天文学家,1571 年 12 月 27 日出生在德国的符腾堡。苦难,从他降临的那一刻就开始伴随着他。他是一个早产儿,先天严重不足。在其出生后不久,父亲就应征入伍,一去就再无音讯了。母亲在其父亲失踪后不久,也被以"巫女"的罪名投入监狱。先天不足,后天失调,开普勒的身体一直很不好,体弱多病,猩红热和天花先后降临,侥幸活过来的开普勒变成了一个视力极差的大麻子,满脸都是天花造成的凹坑。



图 2-6 开普勒像

身体上遭受的伤害并没有成为开普勒刻苦学习的障碍。12 岁的时候,他进入修道院学习,凭借着自己的努力,一直都能够获得奖学金。1587 年,只有 16 岁的开普勒进入培养新教徒的神学院——德国的杜宾根大学学习。在这里,他遇到了秘密宣传哥白尼"日心说"的天文学家麦斯特林。在深入研究托勒密的"地心说"和哥白尼的"日心说"之后,他发现托勒密体系有许多漏洞,终于成了哥白尼学说的坚定拥护者。

1591 年,开普勒获得文学硕士学位,后经学校推荐到奥地利格拉茨的一所教

会中学担任数学教师，在那里他开始了天文学研究。1596 年，他写了《宇宙的奥秘》一书，受到了丹麦天文学家第谷(1546—1601，图 2-7)的赏识，他邀请开普勒到布拉格附近的天文台从事研究工作。1600 年，开普勒正式成为第谷的助手，开始了两人合作研究的历程，不过他们的合作并没有延续太长的时间，因为次年第谷就因病去世了。



图 2-7　第谷像

但是，第谷给开普勒留下了一笔宝贵的遗产！

第谷善于设计制造大型和精密的天文仪器，并建立了一所规模宏大的天文台。他是一位出色的观测家，毕生都在认真进行着天文观察，并且留下了详细的记录。如此丰富而翔实的记录，最终都留给了开普勒。

第谷精于观测而不善于数学分析，而开普勒的特长是数学分析，但由于视力所限，并不擅长观测。他们各有所长，配合起来却能取长补短，最终取得科学发现的重大突破。

开普勒首先研究的是火星，因为在第谷的观测数据中，关于火星的数据相当丰富。在分析第谷的资料时，开普勒发现哥白尼所描述的行星运动存在着错误和偏差。开普勒诙谐地写道："我预备征服战神马尔斯(火星的别称)，把它俘虏到我的星表中来，我已为它准备了枷锁。但是我忽然感到胜利毫无把握……这个星空中狡黠的家伙，出乎意料地扯断我给它戴上的用方程连成的枷锁，从星表的囚笼中冲出来，逃往自由的宇宙空间去了。"于是，他决心找出行星运动的真实"轨道"。在一年半的时间里，开普勒做了多达 70 次的复杂计算，终于找到了一个比较理想的方案。但细心的开普勒发现，由此算出的火星位置和第谷数据之间仍然相差 $8'$，即 $0.133°$。这个角度很小，只相当于手表秒针在 0.02 s 瞬间转过的角度。出于对第谷观测资料可靠性的确信，开普勒对轨道圆形的老观念产生了怀疑。他试着用椭圆轨道去代替圆形轨道，并设想火星运动速度的大小是变化的，而这种变化应该与火星到太阳的距离有关：火星在轨道上接近太阳时，速度变快；远离太阳时，速度变慢。

开普勒的大胆探索，终于取得了成功。1609 年，开普勒出版了《新天文学》(又名《论火星的运动》)一书，书中提出了行星运动的两个定律，即椭圆定律和等面积定律。就是我们通常所称的开普勒第一定律和第二定律(图 2-8)。

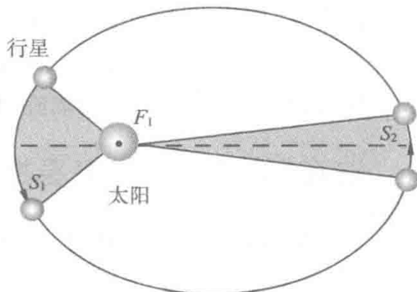


图 2-8　开普勒第一、第二定律

椭圆定律:所有的行星分别在大小不同的椭圆轨道上围绕太阳运动,太阳在这些椭圆的一个焦点上。

等面积定律:太阳和运动着的任一行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积。

这两条定律使计算行星轨道和其位置的工作大大简化,但开普勒并没有满足。他知道自己还远远没有揭开行星运动的全部奥秘。开普勒又回到第谷留下来的大量观测数据中,又经过大约 10 年时间的潜心研究,进行了大量复杂的运算,终于找到了观测数据中内含的奇妙规律。开普勒于 1619 年公布了他发现的新的行星运动定律——所有行星的轨道的半长轴的三次方跟它的公转周期的平方的比值都相等。这就是周期定律,也称为开普勒第三定律。

开普勒三定律同样适用于卫星绕行星的运动,也适用于人造地球卫星绕地球的运动。因此,开普勒三定律被人们称为“天空中的法律”,开普勒也被称为“天空立法者”。

开普勒也重视对于引力问题的研究。在接受了哥白尼的日心说之后,他就开始了对行星绕太阳运行的动力问题的思考。在发现了行星的运动规律之后,开普勒就开始思考一个问题:这些行星运动的动力是什么?在思考的过程中,他慢慢意识到行星的运动应该主要是由太阳引起的。

开普勒从磁力中受到启发,认为行星的运动可能是由于太阳对行星的吸引。他还对物体的重力进行了猜想,重力不过是物体之间的吸引力,这种吸引力会随距离的增大而减小,并且与物体的大小有密切的关系。

由此可见,开普勒在发现了行星运动的三定律后,在探索行星运动原因的过程中,已经看到了引力的影子,感受到了引力的存在。他的思考对牛顿的工作具有启发的意义。

然而,开普勒一生却是在非常困苦的逆境中度过的。正如一位科学史家所描述的:“开普勒只有疾病和贫困。”他虽然被封为宫廷科学家,却长期得不到应有的薪水,使他连基本生活都难以维持。1630 年,他几个月领不到薪水,陷于困境。在前去讨取薪水的途中,开普勒突发高烧,几天后便在贫病交困中去世了。



图 2-9　惠更斯像

站在“大门口”的惠更斯

继伽利略和开普勒之后,为经典力学的创立做出贡献、可以被称为“巨人”的应该是荷兰科学家惠更斯。

克里斯蒂安·惠更斯(1629—1695,图 2-9),荷兰

物理学家、天文学家和数学家,是"土卫六"的发现者。1629 年 4 月 14 日,他出生于海牙,父亲是大臣、外交官和诗人,与科学家们常有往来。惠更斯自幼聪明好学,思维敏捷,多才多艺,并受到过笛卡儿的直接指导。16 岁时,也就是 1645 年,惠更斯进入莱顿大学攻读法律和数学,两年后转入布雷达大学。从 1650 年起开始研究光,同时对天文观测产生了兴趣。1655 年,惠更斯获法学博士学位,随即访问巴黎,并在那里开始了他的科学生涯。1663 年,惠更斯访问英国,并成为刚建立不久的英国皇家学会第一个外籍会员。1666 年,应法国国王路易十四邀请,任刚建立的法国科学院院士。在巴黎和伦敦,他结识了许多著名的科学家,如莱布尼茨和牛顿。惠更斯体弱多病,全身心献给科学事业,终生未婚。1681 年,他回到了故乡荷兰。1695 年 7 月 8 日逝世于海牙。

惠更斯的力学研究成果很多,1656 年,他根据伽利略的发现——摆的等时性原理(图 2-10),制造了第一座机械钟。



图 2-10 钟摆的等时性原理的发现

1673 年,惠更斯根据自己所做的摆的实验和一般圆周运动的实验,推算出并发表了离心力公式。如果他把这个公式与开普勒的行星运动三定律联系起来,是很有可能领先于牛顿打开通往万有引力定律的大门。但是,他受到笛卡儿的影响,对引力的观点持反对意见,这就导致他没有能够正确地总结出向心力定律和把它推广到天体运动。而且,由于他始终认为行星的轨道应该是圆形的,最终与发现万有引力定律无缘,但他已站在了通往万有引力定律的"大门口"。

在经典力学奠基之路上,惠更斯在碰撞现象方面的研究同样也是意义重大的。从 1652 年开始,他重点开始研究两个质量相同的球以不同的速度做对心碰撞的情形。经过一番研究后,他发现两个不同的球以不同的速度发生对心碰撞后,将彼此交换速度。不仅如此,他还指出了这种情形的一个特例:一个运动着的球同一个等质量的静止的球碰撞后,前者立即静止,后者则获得这一速度前进。

在关于碰撞过程的研究中,惠更斯还得出并表述了许多重要的力学原理,如动量的概念和动量守恒定律等,甚至完全弹性碰撞的机械能守恒在其表述中也有所体现。

碰撞现象的研究和动量守恒定律的发现,为建立作用和反作用定律准备了一定的条件,从而完成了伽利略以来为建立力学体系所做的奠基性工作。

离万有引力定律最近的人——胡克

在近代力学的发展史上，最接近万有引力定律的应该是罗伯特·胡克。


图 2-11　胡克像

罗伯特·胡克(1635—1703,图 2-11),1635 年 7 月 18 日出生在英国怀特岛。胡克从小体弱多病，性格怪僻却心灵手巧，酷爱摆弄机械。10 岁时，胡克对机械学发生了极大的兴趣。1648 年，胡克的父亲逝世，从此家道中落。13 岁的胡克被送到伦敦当学徒，后来做过教堂唱诗班的领唱，还当过富豪的侍从。在威斯敏斯特学校校长的热心帮助下，胡克修完了中学课程。1653 年，胡克作为工读生进入牛津大学学习。在这里，他结识了一些颇有才华的科学界人士。此时的胡克热心于参加医生和学者的活动小组，并且显露出了独特的实验才能。1655 年，胡克被推荐到玻意耳的实验室工作。由于他的实验才能，1662 年被任命为英国皇家学会的实验主持人，为每次聚会安排三四个实验。1663 年，胡克获硕士学位，同年被选为英国皇家学会正式会员，又兼任了学会陈列室管理员和图书管理员。1665 年，胡克担任格雷沙姆学院教授，并从事天文观测工作。1667 年至 1683 年，胡克任英国皇家学会秘书并负责出版会刊。1676 年，胡克发表了著名的弹性定律。1703 年 3 月 3 日，胡克逝世于伦敦，终年 68 岁。

胡克对行星问题的研究开始于对开普勒行星运动三大定律的研究，在研究过程中，他从先辈的磁力研究中受到了启发，认为行星绕太阳公转的力应该来自于太阳，是太阳的引力使行星的运行轨迹发生弯曲，并使彗星的轨道在太阳附近发生弯曲。这种引力与地面上重力的性质相同，是随着物体之间距离的增加而减小的。

1674 年，胡克根据惠更斯的向心力定律和开普勒行星运动三定律，提出了关于天体引力问题的 3 个假设：

①任何天体都有一种朝向自身中心的引力；

②所有物体，只要它们是做一个方向的简单运动，其都将保持直线运动状态，直到受到其他有效的力作用才会改变其运动轨道，虽然天体在不受外力作用下，其轨道不变；

③离引力中心越近，引力越大。

胡克提出的假设，基本上已经包含了万有引力的基本问题，但缺乏严密的数学证明和定量表达。

1677 年，胡克对天体的相互吸引做出了很明确的解释。他指出："我推测，我们所居住的宇宙中心太阳，对所有的星球和地球产生了一种吸引力，使它们围绕太阳运动；同时，这些星球中的任何一个又会产生一种相应的作用力。"

在研究过程中，胡克已经觉察到引力和重力有着同样的本质，为了弄清楚重力随着物体到地心的距离的变化关系，他还曾经在山顶和矿井下做了一些实验，但遗憾的是并没有得到有价值的结果。

1679 年年底，胡克给牛顿写了一封信，在这封信里面，胡克提出了引力反比于距离的平方的猜想。但是，他没有能够做出非常精确的数学推导，只是追问了一句：如果是这样，行星的轨道将是什么形状呢？

应该说，胡克的研究已经非常接近万有引力定律了。也正因为如此，才会出现后来胡克与牛顿之间关于万有引力定律发现优先权之争。

1684 年，一次偶然的下午茶时间，胡克、伦恩和哈雷(图 2-12)三人在闲聊的时候又将引力问题的研究向前推动了一大步。三个人打了一个赌，谁能够第一个将引力与距离平方反比关系的数学证明拿出来，将可以得到伦恩提供的一笔奖金。



图 2-12　哈雷像

当时，胡克声称自己已经解决了这个问题，但他不想马上公布出结果。而且，胡克还说如果 3 个月之后还没有人能够解决这个问题的话，他才会公布自己的结果，言下之意倒有几分炫耀的意思。

为了尽快地得到结果，哈雷专门在 1684 年 8 月来到剑桥大学，找到了牛顿。结果，牛顿说自己也早就完成了这个证明，不过当时的验算草稿找不到了。不过，他向哈雷承诺，只要给他一点点时间就能重新写出一份来。果然，不久之后，他真的将一份完整的证明过程寄给了哈雷。

牛顿其人

牛顿(图 2-13)于 1642 年 12 月 25 日(新的公历是 1643 年 1 月 4 日)出生在英格兰的一个小村子里。他是一个遗腹子，还是个早产儿，出生时只有 3 磅重(1 磅＝0.453 6 kg，也就是说早产的牛顿连 1.5 kg 还不到)，接生婆和他的亲人都不认为他能活下来。牛顿3 岁的时候，因为家庭经济的压力，他的母亲不得不改嫁，但对方的条件就是小牛顿不能带过去，如此一来，3 岁的



图 2-13　牛顿像

小牛顿只好由外祖母抚养了。

牛顿 11 岁时，他的继父去世了，母亲再次回到了家中，同时带来了 3 个同母异父的弟弟和妹妹。家庭的不幸，尤其是缺少母爱和必要的家庭教育，牛顿读小学时的成绩并不是很好，“除设计机械外没显出什么才华”。

不过，在机械设计方面，牛顿倒是很小就表现出了不俗的天赋。8 岁的时候，他就利用自己积攒的零钱买了锤和锯来做手工，他特别喜欢刻制日晷，利用圆盘上小棍的投影显示时刻。传说，他还做了一个日晷放在村中央，被人称为“牛顿钟”，一直用到他死后好几年。他还做过带踏板的自行车，用小木桶做过滴漏水钟，放飞过自己制作的带小灯笼的风筝(为此还引来了一场不小的恐慌，因为他是在半夜做的这件事情，以至于被人们误以为彗星降临了，而彗星在当时被认为是灾难的征兆)，做了一架用小老鼠当动力的磨坊模型，等等。他观察自然最生动的例子是 15 岁时做的一次实验：为了计算风力和风速，他在狂风时顺风跳跃和逆风跳跃，再量出两次跳跃的距离差。

因为家庭的经济压力，在母亲的要求下，牛顿无奈地辍学回家务农。但是，在这段时间里，他利用一切时间去自学，放羊时都手不释卷，甚至羊吃了别人家的庄稼他都不知道。一个偶然的机会，他的舅舅发现了这个情况，被他的这种好学精神深深感动，经过慎重的考虑之后，他出面说服了牛顿的母亲，由他在经济上支持牛顿继续上学。1661 年 6 月牛顿考入剑桥大学三一学院，1665 年大学毕业。

1665—1666 年，伦敦流行鼠疫，牛顿回到家乡躲避。著名的苹果落地的故事据说就是发生在这个时期。1667 年牛顿重返剑桥大学，1668 年 7 月获硕士学位。1669 年，巴罗推荐 26 岁的牛顿继任卢卡斯数学讲座教授。1672 年，牛顿加入英国皇家学会。1703 年，牛顿成为皇家学会终身会长。1699 年就任英国造币局局长，1701 年他辞去剑桥大学的工作。因改革币制有功，1705 年牛顿被封为爵士。1727 年，牛顿逝世于肯辛顿，遗体葬于威斯敏斯特教堂。

1687 年，在天文学家哈雷的鼓励和赞助下，牛顿出版了著名的《自然哲学的数学原理》(又译《自然哲学之数学原理》，简称《数学原理》或《原理》，图 2-14)，其中包括牛顿三定律和万有引力定律。这是牛顿对近代自然科学发展做出的重大贡献。牛顿的科学贡献不仅限于力学领域，他在其他领域也做出了很大的贡献：在数学方面，发现了二项式定理，创立了微积分学；在光学方面，进行了太阳光的色散实验，证明了白

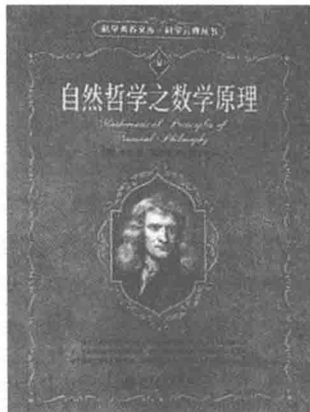


图 2-14 《自然哲学的数学原理》中译本封面

光是由单色光复合而成的，还发明了反射望远镜，等等。

牛顿与万有引力定律

一个著名的故事，一个可能是传说的故事！

一个月圆之夜，在家乡躲避鼠疫的牛顿，饭后静坐在院子里的苹果树下思考。微风过处，一颗熟透了的苹果直直地从树上坠落了下来，恰巧砸在牛顿的脑袋上！这一砸，并没有将牛顿砸晕过去，反而将他的思绪砸得飞扬起来。



图 2-15　苹果落地引起牛顿的思考

苹果熟透脱离树枝的时候，只会向下坠落，这是地球对它有吸引的缘故！可是，高悬的月亮为什么不会坠落下来呢？由坠落的苹果，牛顿直接想到了天空中高悬的明月！这两个看似无相关的东西，其中却蕴含着解不开的联系，揭开了其中的联系，也就找到了一个自然界存在的普遍规律(图 2-15)。

这是一个故事，很多时候我们愿意认为它是真实的，但也有很多人怀疑它的真实性！其实，真实还是不真实，在现在看来，并不是最重要的。何故？我们了解前辈人物的历史，目的是为了学习其中有积极意义的东西，牛顿或许并没有被苹果砸过，但他一定很认真地思考过相关的引力问题，而且，他研究这个问题也是经历了一个漫长的过程的。

牛顿在大学学习期间，接触到亚里士多德的运动理论，后来又读到伽利略和笛卡儿的著作，受他们的影响，开始了动力学的研究。在牛顿写于 1665—1666 年的手稿中，提到了几乎全部力学的基础概念和定律，给出了速度的定义，对力的概念做了明确的说明，他还用独特的方式推导了离心力公式。离心力公式的推导是推导引力的平方反比关系的必由之路。惠更斯到 1673 年才发表了离心力公式，牛顿在 1665 年就运用了这个公式。

牛顿将力学问题搁置了十几年，直到 1679 年。在这期间，他创立了微积分，这一数学工具使他有可能更深入地探讨力学问题。

1679 年年底，牛顿意外地收到了胡克的一封来信，胡克向牛顿询问地球表面上物体下落的轨迹是什么，牛顿在回信中错误地认为，这个轨迹是终止于地心的螺旋线。后来，胡克在下一封信中指出了其中的错误，牛顿也承认了错误。但回答胡克第二封信时牛顿又出了错，他推导证明了一种轨道，是在重力等于常数的

情况下做出的。胡克于是再次复信指出错误,信中胡克认为重力是与距离的平方成反比变化的。这些信成了后来胡克与牛顿争夺万有引力定律发现优先权的依据。牛顿则坚称,自己早就从开普勒第三定律推导出了平方反比关系,认为胡克在信中提出的见解缺乏坚实的基础,所以一直拒绝承认胡克的功绩。

其实,胡克的提示对牛顿是重要的,1679—1680 年间两人的通信对牛顿有深刻启发,以后他采用了惠更斯创造的"向心力"一词,并在 1680 年证明椭圆轨道中的物体必受一指向焦点的力,这个力与到焦点的距离的平方成反比。当然,椭圆轨道的平方反比定律和万有引力定律还不是一回事。到这个时候,牛顿仍没有正确地认识万有引力。

哈雷在 1684 年 8 月专程到剑桥向牛顿征询关于平方反比关系的问题,对此牛顿立刻回答说:行星轨道应是椭圆。哈雷问他:为什么?牛顿答已做过计算。但是,当时牛顿并没有能够马上提供推导的过程。但很快他就按哈雷的要求重新做了计算,并将证明寄给了哈雷。这篇论文没有题目,人们通常称之为《论运动》,牛顿在这篇论文中讨论了在中心吸引力的作用下物体运动轨道的理论,由此导出了开普勒的三个定律。但还有两个关键问题没有解决,一个是对惯性定律的认识,牛顿在《论运动》一文中,仍然停留在固有力和强迫力这样两个基本概念上。物体内部的"固有力"使物体维持原来的运动状态,做匀速直线运动,而外加的强迫力则使物体改变运动状态。这说明当时牛顿的理论中还含有错误的概念。

第二个问题是吸引的本质,在《论运动》一文中,牛顿仍称引力为重力,没有认识到引力的普遍性,从中更找不到"万有引力"这一名称。

然而牛顿并没有就此止步。在他写出《论运动》一文之后,更深入的思考使他着手写第二篇论文,这一篇比前一篇文章要长得多,由两部分组成,取名为《论物体的运动》。牛顿在这篇论文中解决了惯性问题,他承认圆周运动是一个匀加速运动,有了惯性定律,其他问题就迎刃而解。另一个主要进展是对引力的认识。在《论物体的运动》中,他证明了均匀球体吸引球外每个物体,吸引力都与球的质量直接成正比,与物体到球心的距离的平方成反比。他提出可以把均匀球体看成是质量集中在球心。吸引力是相互的,并且通过三体问题的运算,证明了开普勒定律的正确性。他把重力扩展到行星运动,明确了引力的普遍性。

《论物体的运动》第二部分,后来以附录的形式收在《原理》一书中,题名《论世界体系》,在文中牛顿突出地阐述了万有引力的思想。这一思想在 1687 年出版的《原理》中表述得更为明确,至此牛顿终于领悟了万有引力的真谛,把地面上的力学和天上的力学统一在一起,形成了以三大运动定律为基础的力学体系。

牛顿所建立的万有引力定律是经过检验才得到普遍承认的。

关于地球的形状，是对牛顿理论的第一个重大考验。牛顿指出，行星由于自身的旋转，赤道部分应该隆起，使星体两极呈现扁平，所以地球是个扁球体。因此，赤道隆起部分将一部分接近太阳和月亮，一部分远离太阳和月亮，它们受到的引力作用也不同，牛顿近似地估算出地球的扁率为 1/230。18 世纪 30 年代，当牛顿的学说传到法国时，这个结论立即受到巴黎天文台台长雅克·卡西尼（1677—1756）等人的激烈反对，他们根据笛卡儿的旋涡假说和错误的纬度长度的测量，认为地球是两极凸出的椭球体。形象地说，牛顿认为地球呈现“橘子”形状，而卡西尼认为地球呈现“柠檬”形状。

为得到更准确的大地测量结果，法国科学院于 1735 年和 1736 年先后派出两支测量队，分赴赤道地区的秘鲁和高纬度的拉普兰德进行测量。测量结果基本上符合牛顿的看法，后来拉普兰德测量队的领队莫泊丢（1698—1759）和成员克雷洛（1713—1765）都成为牛顿学说的支持者。

在牛顿之前，彗星被看作一种神秘的现象。牛顿却断言，行星的运动规律同样适用于彗星。哈雷根据牛顿的引力理论，对 1682 年出现的大彗星（即后来命名的哈雷彗星）的轨道运动进行了计算，指出它就是 1531 年和 1607 年分别出现的同一颗彗星，并预言它将在 1758 年末再次出现。1743 年，克雷洛计算了遥远的行星（木星和土星）对这颗彗星的作用，指出它将推迟于 1759 年 4 月份经过近日点。这个预言后来果然得到了证实。

对于万有引力公式中引力常量的测定也从地面上的实验角度对万有引力定律提供了直接证明。1798 年，英国物理学家卡文迪许（1731—1810）把两个小铅球系在一根直杆的两端，用一根细线系在直杆中间并吊起，然后用两只大铅球分别靠近两个小铅球，通过细线的扭转测量了大球与小球之间的引力作用，从而得出了引力常量的值（图 2-16），并计算出了地球的质量和密度。

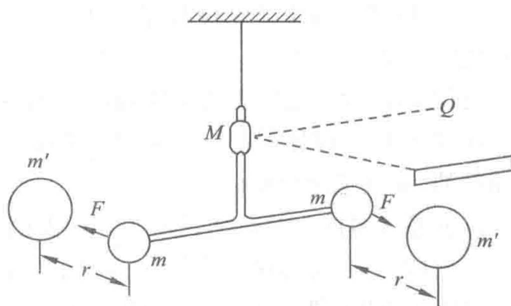


图 2-16　卡文迪许测量引力常量的扭秤原理图

18 世纪末 19 世纪初，人们对天王星的运动的观测和理论结果之间存在着明显的偏差。英国大学生亚当斯（1819—1892）在 1845 年、法国天文学家勒维耶（1811—1877）在 1846 年各自独立地根据牛顿引力理论进行了计算，预言了在天

王星轨道之外的一个未知行星的质量、轨道和位置。勒维耶将他的计算结果写信告诉了柏林天文台的伽勒(1812—1910),伽勒于1846年9月23日夜间在预定的地点发现了这颗新的行星,即对天王星的运行产生作用的海王星。它的发现,被认为是牛顿引力理论的伟大胜利。

牛顿与《自然哲学的数学原理》

1687年,牛顿出版了《自然哲学的数学原理》(《原理》),这是他科学创造的顶峰。在这本巨著中,牛顿概括了他的前辈伽利略、笛卡儿、开普勒、惠更斯和胡克等人的研究成果,以及他自己的创造,首次创立了一个地面力学和天体力学统一的严密体系。所以,《原理》的出版,标志着经典力学体系的建立。

《原理》共有两大部分。第一部分仿照欧几里得建立几何体系的做法,首先提出了定义和动力学原理,为建立力学的逻辑体系提供了前提;第二部分是这些基本原理的应用,包括三编。

在"定义和注释"中,他提出了8个定义和4个注释。其中,8个定义分别是质量、动量、惯性、(外加)力以及4个关于向心力的定义。在4个"注释"中,牛顿阐明了自己的时空观以及相对运动和绝对运动的观点。他知道,在自然界里观察到的运动都是具有相对性的,但他认为,"在哲学探讨中,我们应该把它们从我们的感觉中抽出来,考虑事物本身"。

在"运动的基本定理或定律"中,牛顿总结出了机械运动的三个基本定律。

定律1:每个物体都保持其静止或匀速直线运动的状态,除非有外力作用于它迫使它改变那个状态。

定律2:运动的变化正比于外力,变化的方向沿外力作用的直线方向。

定律3:每一种作用都有一个相等的反作用;或者,两个物体间的相互作用总是相等的,而且指向相反。

这就是著名的牛顿运动三定律。现在把"定律1"称为"惯性定律",是伽利略首次提出的,后来经过笛卡儿等人的发展,由牛顿确立为经典力学体系中的一条基本定律。把"定律2"称为"加速度定律",它最早也是伽利略提出的,并且由牛顿最终确立。还应该指出,在"定律2"中,牛顿只指出了力的作用同运动的变化成正比。1750年,欧拉(1707—1783)才指出应该把力同运动的变化率(即加速度)联系起来,并写成 $f=ma$。"定律3"也常常被称为"作用与反作用定律"。

作用和反作用定律可以说是牛顿对力学基本原理的一个最具有独创性的贡献。虽然笛卡儿和惠更斯等人在牛顿之前通过对碰撞的研究已接触到这个定律的实质,但牛顿却从机械系统总运动量的不变中更深入地分析了系统内部动量传

递的关系，从而发现了一个孤立的物体不能施力也不能受力，只当两个物体相互作用时才产生力的这一令人惊奇的事实。

紧随这3个定律之后，牛顿给出了6个推论，其中包括力的合成和分解，以及运动的叠加原理；动量守恒定律和力学的相对性原理。

《原理》第二部分的第一编是讨论万有引力定律和有心运动问题的，最后一章是牛顿光学的力学基础，为解释光的折射，牛顿提出了光在密媒质中的速度比在疏媒质中更大的假设。第二编讨论了物体在有阻力的介质中的运动。包括在与速度有关的阻力作用下的运动，流体力学问题，液体和弹性介质中波的传播以及旋涡运动的规律等。

第三编的总题目是"论宇宙系统"，主要讨论天体力学理论，其中包括行星、卫星和彗星的运动，地面上的落体运动和抛射体运动以及潮汐现象等。

《原理》以其宏大的篇幅、精湛的思想、严谨的体系和丰富的内容，成为物理学发展史上一部光辉的经典著作。

多才但短命的托里拆利

埃万杰利斯塔·托里拆利（1608—1647，图2-17）是意大利物理学家和数学家。1608年10月15日，他出生在意大利法恩扎的一个贵族家庭，幼年时就表现出了惊人的数学天赋。十七八岁时，他卓越的数学才能更是充分地展示出来。于是在他20岁时随伯父到罗马，受教于伽利略的学生卡斯德利。卡斯德利是当时远近闻名的数学家和水利工程师，他在数学领域内很多方面都有卓著的成就，还为水力学奠定了科学的基础。卡斯德利见托里拆利年轻聪慧，十分喜爱，便指派他为自己的私人秘书，在学术上给予指导。



图2-17　托里拆利像

托里拆利深入研究了伽利略的《两种新科学的对话》这本书，并从书中获得了很多有关力学原理发展的启发。1641年，托里拆利出版了《论重物的运动》一书，企图对伽利略的动力学定律做出新的结论。卡斯德利在拜访伽利略时，将托里拆利的论著拿给伽利略看。伽利略看完后非常欣赏托里拆利的卓越见解，便邀请他前来当自己的助手。托里拆利来到佛罗伦萨，见到了伽利略，此时伽利略已双目失明，卧床不起，生命已进入了倒计时。在伽利略生命的最后3个月中，托里拆利担任了他口述的笔记员，成了伽利略最后的学生。

1642年伽利略逝世后，托里拆利接替伽利略任比萨大学数学教授，并被任命

为宫廷首席数学家，从此他可以做一些实验研究了，不再像以往那样只能从事理论探索。后来，托里拆利大大充实了伽利略的著作《两种新科学的对话》。托里拆利在佛罗伦萨生活了五年，直至去世。在这五年的时间里，托里拆利进行了大量的科学研究，还结识了画家罗莎、古希腊文明研究学者达狄和水利工程师阿里盖提，并受到了上层人物们的普遍敬重。他还应邀做了 12 次学术演讲，演讲题材广泛，其中有 6 次是关于物理学方面的。这些讲稿在语词方面均无可挑剔，为常人所不及，是典型的意大利文学作品。他的演讲中还充满着文艺复兴时代的斗争精神，抨击了那种尽全力维护顽固守旧势力的天主教思想，多次欢呼伽利略的成就，捍卫了伽利略的学说。

在 39 岁生日之际，托里拆利突然病倒，几天后与世长辞，被安葬在圣洛伦索。在他短短的一生中，取得了多方面杰出的成就，赢得了很高的声誉。为了纪念他，国际编号为 7 437 的小行星被命名为“托里拆利”。

托里拆利实验

托里拆利设计了一个很巧妙的实验来测量大气压强。后来人们为了纪念他，就把这个实验称为“托里拆利实验”(图 2-18)。

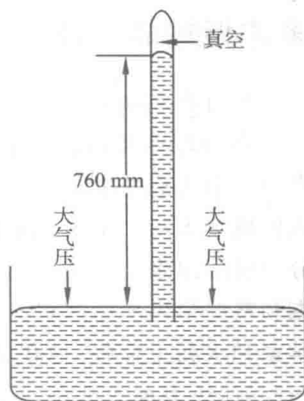


图 2-18　托里拆利实验

1628 年，托里拆利的老师卡斯德利出版了一部有关流体力学的著作。托里拆利仔细研读了老师的著作，还进行了一系列的实验，逐个验证书中的结论。实验中，托里拆利发现书中“液体从容器底部小孔中流出的速度和小孔离液面高度成正比”的结论与自己的实验结果不符。经过反复测量和计算，他总结出水从容器底部小孔流出的速度和水从小孔上方的水面高度自由下落到小孔时候的速度相同，进一步得出了这个速度和小孔到水面的高度的平方根成正比的正确结论。

1640 年，意大利的一位公爵在自己的花园里建造了一个很大的喷水池。建成以后，当公爵陪着客人准备欣赏喷水效果时，发现连一滴水也喷不出来。公爵赶快请伽利略来解决这个难题。伽利略发现，这个喷水池的水源是井水，而井太深，抽水机抽不上水来。但是，为什么会这样呢？

伽利略当时年事已高，但对此非常感兴趣并猜测：真空泵之所以能克服重力并把水传输到高处，是因为管子内部的真空可能具有一种作用力的结果，他把这种作用力称为“真空力”；他还进一步猜测，真空泵之所以只能把水输送到10 m 左

右的位置，可能是因为“真空力”有一定的限度。年迈多病的伽利略没有精力去继续研究这个问题，便把这个问题交给托里拆利，并提示他如果水有这么一个高度限制，那么其他液体也一定有一个类似的高度限制，并且液体密度越大则对应的高度越低。后来托里托将水改为水银，又将铅管改为玻璃管，成功地进行了后来以他的名字命名的实验：他找来一根细长的玻璃管，又找来几个小玻璃瓶和一个小碗。玻璃管一端开口、另一端封闭。他先慢慢地往管子里灌水银，然后用食指按住开口的一端，把玻璃管缓慢地倒过来，再放入小碗内(小碗内预先已倒上一些水银)，使玻璃管的开口完全淹没在水银中。放开食指，管里的水银面就下降，管内的水银面降到离小碗的水银面一定高度时就停止。即使把玻璃管倾斜，进到管内的水银虽然多些，可是管内外水银面的高度差不变。

托里拆利实验的结论与伽利略先前的猜测相去甚远，甚至是背道而驰，原先伽利略认为的“真空泵之所以能克服重力并把水传输到高处，是因为管子内部的真空可能具有一种作用力的结果”，被托里拆利定论为“真空泵之所以能克服重力并把水传输到高处，是因为管子外部的大气所具有的重力作用的结果”；原先伽利略认为的“真空泵之所以只能把水输送到 10 m 左右的位置，可能是因为‘真空力’有一定的限度”，被托里拆利定论为“真空泵之所以只能把水输送到 10 m 左右的位置，是因为大气压具有一定的限度”。

格里凯与马德堡半球实验

1654 年的一天，德国马德堡市的一块空地上聚集了不少王公贵族和大量的群众，甚至德国皇帝斐迪南三世也来了。从人们焦急等待的神情可以看出，这里很快就要进行一场有趣的表演。

一些人忙碌着，把两个空心铜半球很好地合在一起，然后抽出球中的空气。又把两匹马套在球的两边，让马尽力向两边拉，但它们却没能把两个半球分开(图 2-19)，两个半球依然牢固地密合在一起，好像有什么巨大的魔力压在两个铜半球上一样。



图 2-19　马德堡半球实验

表演者又让马夫在球两边各多套了几匹马，每匹马都拼命地向外拉。就这样，两个半球仍密合在一起，直到球两边各套上8匹健马时，密合着的铜球才勉强被分开，同时发出了一声巨响。使这两个半球分开竟然如此困难，这是在场所有的观众所未曾想到的。因此，当两个半球被勉强分开时，连皇帝都非常惊讶。

这个场面有点像魔术表演，实际上却是一个重要的科学实验。它就是著名的马德堡半球实验，这个实验证明了大气压强的存在。

这个实验的"导演"是马德堡市当时的市长格里凯(1602—1686)。格里凯忙于政务之外，还醉心于科学研究，做过许多著名的实验。

据说，第一架起电机也是他发明的。早先，人们要获得电，主要依赖于摩擦，用玻璃棒摩擦毛皮，或是用手摩擦硫黄等。但通过这样的方式获得的电量很少，而且还很不方便。格里凯开始进行电学研究时，就感到用手摩擦得电很费事，于是设计并制造了一台简易的起电机。他找了一个小孩脑袋那样大小的球形玻璃瓶，把粉末状的硫黄倒进去，然后用火加热，使硫黄全部熔化。冷却之后再把玻璃瓶打碎，就得到了一个硫黄球。接着沿硫黄球直径穿一个孔，插入一个铁棒当轴，安装在座架上，这样球就能绕轴转动了。他将干燥的手掌放在硫黄球的表面，不断地转动硫黄球，借助于硫黄球表面与手掌的摩擦，可以获得大量的电荷。

年轻时，格里凯学过法律和数学，曾在莱顿大学读书，发现光的折射定律的斯涅耳可能教过他。格里凯还到法国和英国游学，后回到德国当工程师。当时正值"三十年战争"，格里凯参军为国家效力。战后，他来到了马德堡，四十多岁时他被选为马德堡市市长，并且连任了35年，直到80岁时才退下来。

格里凯在学习亚里士多德的理论时，他觉得"自然界排斥真空"的说法是有问题的。为此，1650年他进行了马德堡半球实验。为了制作铜制的半球和抽取真空的设备以及进行实验，他不惜工本，花费很大。

既然确认存在真空，就可以研究真空的性质了。例如，声音可以在空气中传播，也可以在液体和固体中传播，却不能在真空中传播。格里凯还发现，蜡烛在真空中不能燃烧，动物不能在真空中生存。不过，格里凯还不知道为什么动物在真空之中不能生存，这个问题大约在120年之后才由英国科学家普里斯特利和法国科学家拉瓦锡发现的氧气以及拉瓦锡建立起来的氧化理论加以说明。

格里凯的抽气机操作起来并不容易。抽气机的结构并不复杂，但在抽气时要用一根绳子拉拽活塞。拉拽这个活塞要用很大的力气，需要50个人才能拉动。因此，抽去气体的工作是十分费力的。

格里凯的表演对知识的传播极其重要。观看真空表演时，百姓知道空气居然具有重量！相对于托里拆利对真空的研究，格里凯并未增加人们掌握的真空知识

的数量，但却促使学术界能够理解、关注和接受真空的知识，并且使人们逐渐地放弃了亚里士多德“自然界厌恶真空”的观点。

格里凯的电学研究也具有重要的意义，他自己也知道他的“发电”装置具有重要的价值，为此，他于1672年给著名的哲学家和科学家莱布尼茨写信，报告了自己的电学研究成果。

格里凯的兴趣十分广泛。他甚至猜测彗星也是太阳系的成员，它们围绕着太阳旋转，并且这种绕日运行是有周期性的，人类会定期见到它们。令人惊讶的是，在他去世之后20年，哈雷证实了格里凯的见解。格里凯的这种观点对破除彗星的神秘性是有很大帮助的。

今天再次回顾格里凯的马德堡半球实验，你是不是想到格里凯的观点和他传播新知识的贡献呢?!

英年早逝的帕斯卡

帕斯卡(1623—1662，图2-20)是法国物理学家。小时候的帕斯卡善于思考，喜欢问为什么，并且愿意动手做一些实验。据说，有一次帕斯卡在厨房外面玩耍，听到厨师把盘子弄得叮叮当当地响，这看似普通的声音立即引起了他的深思。他想：为什么刀离开盘子以后，声音不马上消失呢？于是就自己进行实验研究。结果，他发现盘子被敲击之后，声音连绵不断，但只要用手一按盘子，声音就马上停止了，手指碰到发声的盘子边，还有点发颤的感觉呢！哦！原来发声最要紧的因素是振动，敲击停止了，但只要振动不停止，物体就依然能够发出声音来。就这样，通过简单的实验，11岁的帕斯卡懂得了声音是由于物体的振动产生的。



图2-20　帕斯卡像

1646年，托里拆利实验的相关信息传到了法国，帕斯卡立即重新进行实验。此外，他还自己设计和进行了许多有趣的实验，在分析总结这些实验的基础上，写出了《关于真空的新实验》一书，用实验证实了托里拆利的发现是正确的。他进一步猜想：大气压既然是由大气重力产生的，那么，越向高处，大气层越薄，大气压也应当越小了！

1648年，帕斯卡在巴黎的教堂顶上做了托里拆利实验，效果不是特别明显。为了得到更肯定的结果，他写信给他的妻兄，请妻兄在高约1 000 m的多姆山山顶上和山脚下同时做托里拆利实验。实验结果表明山顶上的大气压强比山脚下

的小。帕斯卡的猜想得到了证实。

多次测量表明，在距离海平面 2 000 m 的高度以内，平均每升高 12 m，水银柱大约降低 1 mm。因此，知道了大气压跟高度的关系，就可以根据大气压的大小来估算出某处的高度。后来人们根据这个规律制成了高度计，用来测量不同地区的海拔。

帕斯卡的实验还解开了长期以来未解的“高山之谜”：在高山上，往往煮不熟饭，人们呼吸短促，缺氧。这实际上是由于那里的大气压很低、空气稀薄。

同样是在 1648 年，帕斯卡还演示了另外一个著名的实验：在地面上放一个密闭的装满水的桶，桶盖上插入一根细长的管子，从三楼的阳台上向细管子里灌水。结果只用了几杯水，就把桶压裂了！

此外，帕斯卡还研究了液体的力学性质问题，发表了论文《关于流体平衡的实验》，提出了著名的帕斯卡定律。后来，为了纪念帕斯卡在研究压强方面的杰出贡献，国际单位制中用“帕斯卡”来作为压强的单位。

但令人遗憾的是，这样一位才华横溢的青年，竟然在风华正茂的时候决定放弃科学研究，投身到神学研究中去了。更为极端的是，他将一条带着尖刺的腰带缠在腰上，每当头脑中有不够“虔诚”的念头出现时，就用手去打腰带惩罚自己。由于他这样自我折磨，年仅 39 岁就去世了。

伯努利与伯努利原理

1912 年的秋天，当时世界上最大的轮船之一、远洋货轮“奥林匹克号”正在大海上航行。突然，一艘比它小得多的铁甲巡洋舰“豪克号”从后面追了上来，在离它 100 m 的地方几乎跟它平行地疾驰。就在这时，一件意外的事情发生了：“豪克号”好像着了魔似的，竟然扭转船头朝“奥林匹克号”冲了过来，“豪克号”上的舵手怎么操作也没有用。结果，“奥林匹克号”无可奈何地接受了“豪克号”的亲密接触，并付出了极大的代价——船舷被“豪克号”撞了一个大洞。

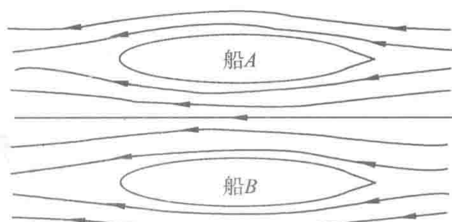
在海事法庭审理这件奇案的时候，“奥林匹克号”的船长被判为有过失的一方，法院认为，这是因为他没有发出任何命令给横着撞过来的“豪克号”让路。船长虽然感到自己很冤枉，但没有办法解释，只好蒙冤受屈。案子就这样结束了，但这件事情却引起了一些科学家的注意，他们认为这次事件一定事出有因。



图 2-21 伯努利像

其实，早在 1726 年，有一个叫丹尼尔·伯努利（1700—1782，图 2-21）的人就已经注意到：如果水沿着一条有宽有窄的沟（或粗细不均的管子）向前流动，在

沟的较窄部分就流得快些，但水流对沟壁的压力比较小；反之，在较宽的部分水就流得较慢，压向沟壁的力则会比较大。这一发现，后来被人们称为伯努利原理（图 2-22）。



两艘平行前进的船，好像会互相吸引

图 2-22　用伯努利原理解释现象

这个原理虽然发现得较早，但一直不被人们重视。出现了“奥林匹克号”被撞事件后，一些科学家突然想到，用这一原理来解释这次事故是非常合情合理的。于是，自此以后伯努利原理才渐渐得到了它应受的重视。这是一条普遍性的原理，它不仅对于流动的水是适用的，而且对于流动的其他液体甚至气体也适用。

丹尼尔·伯努利出生于荷兰的格罗宁根，16 岁时获艺术硕士学位，21 岁时又获得医学博士学位。他曾申请解剖学和植物学教授职位，但未成功。

丹尼尔受父兄影响，一直很喜欢数学。1724 年，他在去威尼斯的旅途中发表了《数学练习》一文，引起学术界关注，并被邀请到圣彼得堡科学院工作。1725 年，25 岁的丹尼尔受聘为圣彼得堡科学院生理学院士和数学院士。1727 年，20 岁的欧拉（后人将他与阿基米德、牛顿和高斯并列为数学史上的“四杰”）到圣彼得堡工作，成为丹尼尔的助手。

然而，丹尼尔不习惯圣彼得堡的生活，以至于 8 年以后的 1733 年，他找到机会返回巴塞尔，终于在那儿成为解剖学和植物学教授，后又成为物理学教授。

1734 年，丹尼尔荣获巴黎科学院奖金，以后又 10 次获得该奖金。能与丹尼尔媲美的只有大数学家欧拉。丹尼尔和欧拉保持了近 40 年的学术通信，在科学史上留下了一段佳话。

在伯努利家族中，丹尼尔是涉及科学领域较多的人。他出版了经典著作《流体动力学》，研究了弹性弦的横向振动问题，提出了声音在空气中的传播规律。他的论著还涉及天文学、地球引力、潮汐、磁学、振动理论、船体航行的稳定和生理学内容等。博学的丹尼尔成为伯努利家族的代表人物。

丹尼尔于 1747 年当选为柏林科学院院士，1748 年当选巴黎科学院院士，1750 年当选英国皇家学会会员。

1782 年 3 月 17 日，丹尼尔·伯努利在瑞士巴塞尔逝世，终年 82 岁。

二、电磁学



现代生活中，电与磁已经成为不可缺少的东西。之所以能够让电和磁为人类服务到如此的地步，是与人类对电和磁的研究有着悠久的历史分不开的。

电磁学之父——吉尔伯特

两千多年前人们就已经知道摩擦过的琥珀会吸引细小的干木屑，并形象地把琥珀的吸引力叫作“琥珀之力”。最早对电现象进行系统研究的是英国的吉尔伯特(1540—1603，图 2-23)。



图 2-23　吉尔伯特像

1540 年 5 月 24 日，吉尔伯特出生于英国的科尔切斯特市，他的父亲是一个大法官，家庭条件非常优越。幼年的吉尔伯特受到了良好的教育，也表现出了较高的智慧。后来他成功地进入了剑桥大学圣约翰学院，攻读医学，并且获得了医学博士学位。他的医术十分高明，从 1601 年开始担任英国女王伊丽莎白一世的御医，直到 1603 年 12 月 10 日逝世。

吉尔伯特也是一位科学家。他通过实验发现，不仅琥珀(图 2-24)在被摩擦之后能吸引轻小物体，而且还有许多物质如金刚石、水晶、硫黄、玻璃和松香在摩擦后也有类似的“琥珀之力”。于是他根据希腊文的“琥珀”一词创造了“电”这一名称。



图 2-24　能摩擦起电的琥珀

从历史上看，吉尔伯特对电现象研究的贡献是很大的，有些人甚至把他称为“电学之父”。对磁现象的研究，吉尔伯特也做出了许多贡献。他曾经用一个球形磁石模拟地球进行实验，检查放在球面上小磁针的指向。他发现小磁针的行为与它们在地球上时一样，从而得出了地球本身是一个巨大磁石的结论。吉尔伯特还试图把制约天体运动的力归于磁力。其后，开普勒在探索太阳系中行星的运动规律时就受到吉

尔伯特的影响。吉尔伯特写的《论磁》一书总结了他那个时代关于电和磁的知识。

《论磁》(6卷)中的所有结论都是建立在观察与实验基础上的。书中记录了磁石的吸引与推斥;磁针指向南北的性质;烧热的磁铁磁性消失;用铁片遮住磁石,它的磁性将减弱。他研究了磁针与球形磁体间的相互作用,发现磁针在球形磁体上的指向和磁针在地面上不同位置的指向相仿,还发现了球形磁体的极,并断定地球本身是一个大磁体,提出了"磁轴"和"磁子午线"的概念。总之,在磁现象的研究方面,吉尔伯特的成就是光辉的,贡献是巨大的。

在吉尔伯特的著作中,也叙述了他对电现象的研究内容。他研究了十几种物质,发现它们中的大多数被摩擦后同琥珀和玛瑙被摩擦后相似,可以吸引轻小的物体。他首先指出,这是与磁现象有本质区别的另一类现象,他第一个称电吸引的原因为电力。

吉尔伯特制成了第一台验电器,并用它证明了离带电体越近,吸引力越大,还指出电引力沿直线;带电体被加热或放在潮湿的空气中,它的吸引能力就消失了。

对电的本质,吉尔伯特也试图加以解释,他认为存在一种"电液体",带电体吸引其他物体时,"电液"就从带电体流向被吸引的物体;他还认为,带电体被加热时电性消失的原因是"电液"蒸发了……当时他提出的概念说明电是地地道道的物质,这有重要的意义。

可叹的是,吉尔伯特的名著《论磁》直到19世纪末还很少为人了解,其先进的科学思想在英国也很少有人知道。因为他的作品都是用拉丁文出版的,而这种文字在当时的英国并不普及。1889年成立了吉尔伯特俱乐部。1900年,根据汤姆孙的倡议,才出版了吉尔伯特名著的英译本。

富兰克林与雷雨中的风筝

夏日,天气突变之时,总能见到乌云密布、电闪雷鸣的景象,煞是吓人!正是因为如此,在无知无识的年代里,人们对这种自然界中的放电现象充满了恐惧与迷茫。随着人类智慧的发展,终于有人开始思考:雷电到底是什么?它与人们在实验室里面观察到的放电现象之间有没有关系?为了检验这样的想法,科学家们走上了实验探索的道路,但这条道路却是不平坦的。



图 2-25　富兰克林像

为了弄清楚空中的雷电和用摩擦方法得到的"摩擦电"是否有区别,本杰明·富兰克林(1706—1790,图 2-25)进行了一个有趣但十分危险的实验。

富兰克林于1706年1月17日出生在美国[①]的波士顿。他的父亲原是英国漆匠，以制造蜡烛和肥皂为业，他是家中的第10个男孩，也是17个孩子中的最后一个男孩。富兰克林8岁上学，虽然学习成绩优异，但由于家庭经济原因10岁时就离开了学校，也就是说富兰克林一生只在学校读了两年书。12岁的时候，他到哥哥经营的小印刷所当学徒，在这里一干就是10年。这个10年里，借助着印刷工人与各种书籍近距离打交道的便利，富兰克林坚持刻苦自学。这种坚持，他从未间断过，甚至他还从伙食费中省下钱来买一些属于自己的书籍。另外，利用工作之便，他还结识了几家书店的学徒，通过他们，富兰克林得以将书店里的书在晚间偷偷地借来，通宵达旦地阅读，第二天清晨及时归还回去。他阅读的范围很广，从科学技术的通俗读物到著名科学家的论文，从一般人写的文章到名作家的作品，无不涉猎。

1736年，富兰克林当选为宾夕法尼亚州议会秘书。1737年，任费城副邮务长。即便如此，学习仍然是富兰克林每天的必修功课。为了更多地汲取知识，他孜孜不倦地学习语言，先后掌握了法文、意大利文、西班牙文和拉丁文。他广泛地接受了世界科学文化的先进成果，为自己的科学研究奠定了坚实的基础。

正当富兰克林在科学研究上不断取得新成果的时候，北美殖民地的民族解放运动日益高涨。为了民族的独立和解放，他站在了斗争的最前列。从1757年到1775年，他几次作为北美殖民地代表到英国谈判。独立战争爆发后，他参加了第二届大陆会议和《独立宣言》的起草工作。1776年，已经七十高龄的富兰克林又远涉重洋出使法国，赢得了法国和其他欧洲大陆国家对北美独立战争的支援。1787年，他积极参加了制定美国宪法的工作，并组织了反对奴役黑人的运动。

1790年4月17日夜里11点，富兰克林溘然逝去。4月21日，费城人民为他举行了葬礼，有两万人参加。富兰克林就这样走完了他人生路上的84个春秋，静静地躺在教堂院子里的墓穴中，他的墓碑上只刻着："富兰克林——印刷工人"。

富兰克林也是著名的科学家。他在电学方面成就显著，富兰克林的"风筝实验"让人们弄清楚了空中的雷电本质上与在实验室得到的"摩擦电"是一样的。而这个实验另一个重要的意义就是导致了一项重要的发明——避雷针。

1752年7月一个雷雨的日子里，富兰克林用绸子做了一个大风筝，风筝顶上安上一根铁丝，这个铁丝与牵引线用的麻绳连在一起，麻绳的下端还连接了一串钥匙。为了不使电直接传到人体，富兰克林在麻绳的下端另外接了一根丝线用以

---

①其实，富兰克林出生的时候，这片区域还不叫美国，甚至还算不上一个国家，而仅仅是大英帝国的北美殖民地。

抓握，并要防止丝线被淋湿而导电。当富兰克林将这个大风筝放飞到低空的乌云中时，一阵雷电打下来，麻绳上松散的纤维向四周竖立起来，靠近钥匙的手和钥匙之间产生了火花，这与摩擦产生的电火花没有什么两样。与此同时，富兰克林还有被电击的感觉。这就是著名的富兰克林“风筝实验”(图 2-26)。



图 2-26　富林克林正在进行“风筝实验”

富兰克林还创造了许多专用名词，如正电、负电、导电体、电池、充电、放电等，现已经成为世界通用的词汇。他借用数学上的正负概念，第一个用正电和负电概念表示电荷性质，当时他称之为“阳电荷”和“阴电荷”。他还提出了电荷不能创造也不能消灭的思想，后人在此基础上发现了电荷守恒定律。

其实，早在“风筝实验”之前富兰克林就曾推测：既然人工产生的电能被尖端吸收，那么闪电也应能被尖端吸收。他由此设计了“风筝实验”，而“风筝实验”的成功反过来又证实了他的推测。他由此设想，若能安装一种尖端装置，就有可能把雷电引入地下。富兰克林把这种避雷装置——一根数米长的细铁棒固定在高大建筑物的顶端，在铁棒与建筑物之间用绝缘体隔开，然后用一根导线与铁棒底端连接，再将导线引入地下。富兰克林把这种避雷装置称为“避雷针”。经过试用，果然能起到避雷的作用。

避雷针在最初发明与推广应用时，教会曾把它视为不祥之物，认为若装上了富兰克林的这种东西，不但不能避雷，反而会引起上帝的震怒而遭到雷击。但是，在美国费城，拒绝安置避雷针的一些高大教堂在雷雨中相继遭受雷击，而比教堂更高的建筑物由于已装上避雷针，在雷雨中却安然无恙。由于避雷针已在费城发挥了作用，很快传到了北美各地，随后又传入欧洲。

避雷针传入法国后，法国皇家科学院中也有人也反对使用避雷针，后来还提出一种观点，即圆头避雷针比富兰克林的尖头避雷针效果会更好。但法国人仍选用富兰克林的尖头避雷针。据说，当时的法国人把富兰克林看作苏格拉底的化身，富兰克林成了人们崇拜的偶像。他的肖像被人们珍藏在枕头下面，而仿照避雷针式样的尖顶帽成了 1778 年巴黎最时髦的帽子。

避雷针传入英国后，英国人也曾广泛采用了富兰克林的尖头避雷针。但美国独立战争爆发后，富兰克林的尖头避雷针在英国人眼中似乎成了将要诞生的美国的象征。据说英国当时的国王乔治二世出于反对美国的需要，曾下令把英国全部皇家建筑物上避雷针的尖头统统换成圆头，以示与作为美国象征的尖头避雷针势

不两立。这真是避雷针应用史上一件有趣且愚蠢的事情！

在雷电研究方面，富兰克林无疑是成功的。但是，在物理学的发展史上，对雷电展开研究的绝不仅仅是富兰克林一人，甚至有人为此付出了宝贵的生命。俄国科学家利赫曼和罗蒙诺索夫在自己的房间里装设了叫“雷电机”的实验仪器，试图让它带上云中的电。1753 年 7 月 26 日这一天，狂风怒号，乌云翻滚，一场雷雨就要来临。利赫曼教授匆匆赶回家中，准备观察他的实验仪器。就在他走近仪器俯身察看的那一刹那，一个拳头大小的浅蓝色火球，从仪器上向他的前额扑来，利赫曼就这样倒下了，成了人类研究雷电道路上殉难的第一位科学家。

库仑与库仑定律

库仑(1736—1806，图 2-27)是法国军事工程师和物理学家。1736 年 6 月 14 日生于法国昂古莱姆。库仑家里很富有，在青少年时期他受到了良好的教育。库仑后来到巴黎军事工程学院学习，离开学校后进入皇家军事工程部队当工程师。工作了 8 年后，他又在埃克斯岛瑟堡等地服役。这时库仑就已开始从事科学研究工作，把主要精力放在研究工程力学和静力学问题上。


图 2-27　库仑像

1773 年，库仑发表了有关材料强度的论文，所提出的计算物体上应力和应变分布情况的方法一直沿用到现在，成为结构工程的理论基础。

1777 年，法国科学院悬赏征求改良航海用指南针中磁针的方法。库仑认为，把磁针架在一个轴上，必然会产生摩擦，进而影响磁针指示方向的精度。他提出，用细头发丝或丝线悬挂磁针。从中他又发现丝线扭转时的扭力和针转过的角度存在一定的比例关系，从而可利用这种装置算出静电力或磁力的大小。这导致他发明了扭秤，能以极高的精度测出非常小的力。由于成功地设计了新的指南针和在机械理论研究上的贡献，1782 年库仑当选为法国科学院院士。

在 1785 年到 1789 年之间，库仑通过精密的实验对电荷间的作用力进行了一系列的研究，连续在法国科学院备忘录中发表了很多相关的文章。1785 年，库仑用自己发明的扭秤进行电力实验，发现了著名的电力定律，即库仑定律。同年，他在给法国科学院的论文《电力定律》中详细地介绍了他的实验装置、测试经过和实验结果。

1789 年，法国大革命爆发，库仑隐居在自己的领地里，每天全身心地投入到

科学研究中。同年,他的一部重要著作问世。在这部书里,他把对有两种形式的电的认识发展到磁学理论方面,并归纳出类似于两个点电荷相互作用的两个磁极相互作用的定律。库仑以自己一系列的研究丰富了电学与磁学的计量方法,将牛顿的力学原理拓展到了电学与磁学领域。

库仑给我们留下了不少重要的著作,其中最主要的有《电气与磁性》一书,共7卷,于1785年至1789年先后公开出版发行。

1806年8月23日,库仑因病在巴黎逝世,终年70岁。

库仑的扭秤实验

1773年,法国科学院给出了一个悬赏课题——“船舶用罗盘的最佳结构”。库仑通过对这一课题的研究,获得了有关扭转力方面的知识。他通过一系列的实验总结出了扭转力公式,发现扭转力与扭转角是成正比的关系。这样,我们就可以借助测量扭转角变化情况来认识扭转力变化情况。

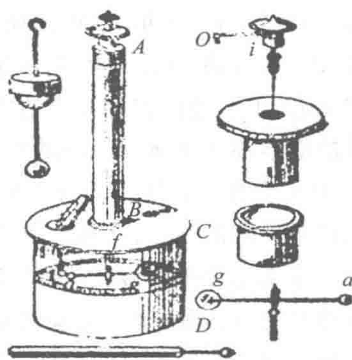


图 2-28 库仑设计的扭秤

1785年,库仑凭借其在扭转力方面的知识,设计制作了一台精密的扭秤(图2-28),进行了测定静电力与带电小球之间距离的关系的实验。他在一个直径和高均为12英寸(1英寸=0.025 4 m)的玻璃圆缸上端安一银质悬丝,悬丝下挂一横杆,杆的一端为木质小球,另一端贴一小纸片,供平衡之用。圆缸上有360个刻度,悬丝自由放松时,横杆上的小木球指到0。他先使另一个相同小球带电,然后使它与杆端小球接触后分开,以便两小球均带同种等量的电荷,互相排斥。当达到平衡时,在这一位置上扭力的大小与电排斥力的大小是相等的。库仑分别使小球相距36个刻度、18个刻度和9.5个刻度,大体上按缩短一半的比例来观测,结果悬丝分别扭转了36个刻度、144个刻度和575.5个刻度。这表明间距为1∶0.5∶0.25,而转角为1∶4∶16。最后一个数据由于漏电而造成了一些偏差。从这样的实验中,库仑得出了“带同类电的两球之间的排斥力,与两球中心之间距离的平方成反比”的结论。

扭秤实验对于测定同种电荷之间的静电斥力是非常灵敏而精确的,但在测定异种电荷之间的静电引力时就显得不是那么完美和方便了。库仑发现,在实验过程中,两个球很难达到平衡,即使是勉强达到了平衡,最后“两球也往往会相碰,这是因为扭秤十分灵活,多少会出现左右摇摆。”在利用扭秤实验不能得到令人满意

的结果之后，库仑转换思路，通过将电的吸引力同地球对物体的吸引力进行类比，设计了电摆实验。经过严密的实验，库仑得出结论："正电与负电的相互吸引力，也是与距离的平方成反比的"。关于异种电荷吸引力的平方反比定律的确凿实验证据，是来自库仑的电摆实验。这样，通过将扭秤实验和电摆实验所得结论结合，库仑才真正地发现静电力与距离的平方反比关系。

科学怪人卡文迪许

亨利·卡文迪许(1731—1810，图 2-29)是英国杰出的化学家和物理学家。1731 年 10 月 10 日生于法国尼斯。1742—1748 年在伦敦附近的海克纳学校读书，1749—1753 年间在剑桥大学圣彼得学院求学。在伦敦定居后，卡文迪许在他父亲的实验室中当助手，进行了大量的电学和化学研究。他的实验研究持续达 50 年之久。1760 年卡文迪许被选为英国皇家学会会员，1803 年成为法国科学院的 18 名外籍会员之一。



图 2-29　卡文迪许像

卡文迪许个子瘦长，带着长长的假发。因为他常常通宵达旦地工作，所以眼皮总是有点儿肿，脸色也有点发黄。许多英国绅士很时髦，讲究衣着整洁。而卡文迪许却总是穿着过时的老式服装，而且许多衣服的纽扣都不全。

卡文迪许的家是"实验之家"。楼下的大房间本来是客厅，卡文迪许把它改作了实验室；楼上的房间本是个卧室，他却在床边装了许多仪器，变成了观察星空的观象台。卡文迪许的"家具"就是仪器。

卡文迪许很少外出，偶尔出去一下，不是参观工厂，就是考察地质。他不愿意也绝不会把时间耗费在舞会和宴会上。

卡文迪许常常被人们称为"科学怪人"。说他怪，他确实有点儿怪。其实，卡文迪许比较孤僻，不太喜欢那些慕名而来的客人打扰自己的研究工作。他不擅长言谈，有人来访的时候他又不得不陪着，于是他常常一语不发，眼睛一直看着天花板。其实，他坐在那里也是心不在焉，脑子中思考的还是自己研究中的问题。他送客人到门口，一转身就飞奔到实验仪器的旁边。

卡文迪许最厌恶和害怕两件事情。一是奉承，他听到奉承的话常常十分窘迫。据说，有一次卡文迪许出席宴会，一位奥地利科学家当面奉承了他几句，听了之后，卡文迪许大为别扭，继而手足无措，终于站了起来，坐上马车回家了。

卡文迪许害怕的第二件事情就是和女人接触，他觉得谈恋爱太浪费时间，以致终身没有结婚。当时，家里有一位女仆负责他每天的饮食，他就将菜单写好放

在餐桌上，等他离开之后，女仆才能够进来，按照菜单准备好饭菜。等女仆把饭菜摆放好离开了，他才进来吃饭。女仆在他家工作了很多年，卡文迪许没有和她说过一句话。

卡文迪许对金钱没什么兴趣。卡文迪许的父亲、祖父和外祖父都是公爵，家里非常富裕。卡文迪许是“学者中的富翁，富翁中的学者”。但是，卡文迪许不会理财，甚至不知道 1 万英镑究竟是多大的一笔钱。有一次，一个仆人因事向他借钱，卡文迪许随手给了他一张 1 万英镑的支票，把这个仆人惊得说不出话来。

诸如此类，关于卡文迪许的“怪事”还很多。其实，这位“科学怪人”并不怪，因为他把自己的一切都奉献给了科学事业。他专心致志地埋头于科学研究，达到了忘我的地步，所以才会出现许多常人看来十分奇怪的事情。

卡文迪许写了大量的科学文稿，但是他从不发表。1810 年卡文迪许逝世后，他的侄子把他遗留下的 20 捆实验笔记完好地放进了书橱，谁也没有去动它。手稿在书橱里一放竟是 60 年，一直到了 1871 年，另一位电学大师麦克斯韦应聘担任剑桥大学教授并负责筹建卡文迪许实验室时，这些充满了卡文迪许智慧和心血的笔记才得以重见天日。麦克斯韦仔细阅读了这位前辈的手稿，不由得连声赞叹，说：“卡文迪许也许是有史以来最伟大的实验物理学家，他几乎预料到电学上的所有伟大事实。这些事实后来通过库仑和法国哲学家的著作闻名于世。”麦克斯韦认真地整理这些手稿，使卡文迪许的科学思想流传了下来。卡文迪许发现一对电荷间的作用力跟它们之间的距离平方成反比，这就是库仑定律的内容；卡文迪许提出每个带电体的周围有“电气”，是关于电场的思想；卡文迪许演示了电容器的电容与插入平板中的物质有关；电势的概念也是卡文迪许首先提出的；卡文迪许还提出了导体上的电势与通过的电流成正比的关系。

卡文迪许活了 79 岁，去世前夕还在做科学实验。

1871 年，剑桥大学用亨利·卡文迪许的遗产，并在英国公爵冯夏尔·卡文迪许（亨利·卡文迪许的亲戚）的私人资助下建成了一座新的实验室。人们为纪念这位伟大的科学家，特意把剑桥大学的这座新实验室命名为“卡文迪许实验室”。

卡文迪许实验室对实验物理学的发展产生了极其重要的作用。这个实验室不仅出成果，更出人才。从 1871 年成立至今，它开拓和发展了电磁理论和实验、气体放电和原子结构、核物理、分子生物学、射电天文学、非晶半导体、凝聚态物理和有机聚合物半导体等很多领域，培养出了大批一流的研究专家。而且，自 1874 年至 1989 年，卡文迪许实验室一共产生了 29 位诺贝尔奖得主，因此被誉为“诺贝尔奖获得者的摇篮”。

抽搐的青蛙腿与伽伐尼的发现

伽伐尼(1737—1798,图 2-30)是一名解剖学教授,通过解剖动物的尸体来研究其内部结构。在从事解剖研究的同时,他对于物理学中的电学研究也保持着浓厚的兴趣,不时地关注着那个时代物理学家们的进展。



图 2-30　伽伐尼像

正是因为如此,伽伐尼的工作台上不仅有着各种各样的解剖工具,也有用于电学实验的摩擦起电机等。在解剖学研究的同时做一点电学的小实验,既是作为一种兴趣,也是一种精神上的休息与放松。

1780 年的一天,伽伐尼解剖了一只青蛙,随后便把青蛙放在了桌上的金属盘子里。就在这个时候,他的一个助手正在摆弄起电机,起电机上摩擦产生的正、负电荷在放电的时候发出了一朵朵电火花。无巧不成书,这时他的另一个助手正在用一把解剖刀碰触青蛙大腿内侧的神经,就在解剖刀接触青蛙腿神经的一刹那,青蛙的四肢突然急剧地抽搐起来,就像活青蛙的动作一样。这一现象立刻引起了伽伐尼的注意,他决定自己亲自试一试,以便发现其中的道理。当伽伐尼也用解剖刀的刀尖去碰触那只被解剖了的青蛙的一条神经时,他果然看到了同样的现象(图 2-31)。

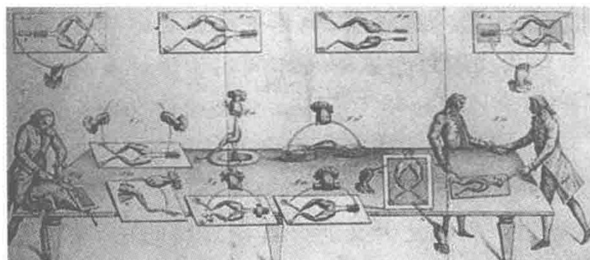


图 2-31　伽伐尼进行的青蛙腿抽搐实验

这个偶然的现象让伽伐尼脑海中灵光一闪,他意识到这应该不是简单的偶然现象,其中或许蕴藏着一种神奇的与电有关的道理。于是,他又变换了很多不同的材料进行了多次实验。通过这一系列实验,伽伐尼基本上弄清楚了用绝缘体或单一导体的刺激并不能引起肌肉的收缩;只有用两种连接起来的金属导体的两端分别与青蛙的肌肉和神经接触时,才会引起青蛙四肢的抽搐。这种情况与早期的电容装置——莱顿瓶通过导体放电是十分类似的,于是伽伐尼大胆地设想这种结构是由神经传到肌肉的一种特殊电流体所引起的,金属起着传导的作用。伽伐尼把这种来自青蛙身上的电流体称为“动物电”。

原始电池的发明者——伏打


图 2-32　伏打像

伏打(1745—1827,图 2-32),1745 年 2 月 18 日出生于意大利科摩城的一个贵族家庭。良好的家庭条件使得他有了接受良好教育的机会。在学生时代,他就对自然科学产生了特别的兴趣。19 岁时他就成了科摩城里的一名物理教师。5 年之后,27 岁的他来到帕维亚大学,担任物理学教授。1774 年,伏打开始担任科摩大学的预科物理学教授。这一年,他发明了起电盘,这是一种靠静电感应原理产生电荷的装置。1779 年,伏打又担任了巴佛大学的物理学教授。1782 年成为法国科学院的成员。1791 年又被选为英国皇家学会会员。1794 年,伏打由于在电学和化学上的贡献,荣获英国皇家学会颁发的科普利奖章。1800 年,他宣布发明了"伏打电堆"——最原始的电池。

伏打喜欢旅行,更是一个擅长交际的人,他与同时代的许多杰出学者都有着密切的联系。1782 年,他旅行到了斯洛伐克,参观了斯卡-希提亚夫尼察的矿业学院。1801 年,他来到法国,在第一执政官拿破仑·波拿巴出席的法国科学院会议上,伏打宣读了介绍自己发明的伏打电堆的论文。为此,法国科学院赠予伏打一枚金质勋章。此后,他还获得了许多的荣誉和奖励。

1819 年,伏打退休回到故乡科摩城。1827 年 3 月 5 日,伏打去世。

伏打在物理学上的主要成就是发明了"伏打电堆",做出这项发明时他已经五十多岁了,算是大器晚成。

1780 年,伽伐尼发现"动物电"的消息很快就传遍了意大利,获悉了这个消息的伏打马上被吸引并且陷入思考之中。作为物理学家,他的注意点主要集中在那两根金属,而不是青蛙的神经上。对于伽伐尼发现的蛙腿抽搐的现象,他觉得这可能与电有关,但是他又认为青蛙的肌肉和神经中是不存在电的,所以他猜想电的流动可能是由两种不同的金属相互接触时产生的,与金属是接触活的动物还是死的动物无关。为了验证自己的猜想,伏打用自己设计的精密验电器,对各种金属进行了相关的实验。通过这些实验,伏打发现只要在两种金属片中间夹上用盐水或碱水浸过的(甚至只要是湿的)硬纸、麻布、皮革或其他海绵状的东西(他认为这是使实验成功所必需的),并用金属线把两个金属片连接起来,不管有没有青蛙的肌肉,都会有电流通过。这就说明电并不是从青蛙的组织中产生的,青蛙腿上的肌肉和神经只不过相当于一个非常灵敏的验电器罢了。

在1796年的一封信中，伏打把金属(以及黄铁矿等某些矿石和木炭)称为第一类导体或干导体，把盐、碱、酸等的溶液称为第二类导体或湿导体。他指出：把第一类导体与第二类导体相接触，“就会引起电的扰动，产生电运动；至于这个现象的原因，目前还不清楚，只能认为是一般的特性”。

伏打用了3年的时间，用把各种金属两两搭配进行实验的方法，研究两种金属接触产生电的现象。他发现，一种金属与某一种金属接触时带正电，它与另一种金属接触时则可能带负电。例如，锌和铜接触时，锌带正电，铜带负电(图2-33)；但铜若与金或银接触，则铜带正电，金、银带负电。伏打以大量的实验为基础，发现了如下的金属起电顺序：

锌—铜—锡—铁—铜—银—金—石墨—木炭

在此序列中任何两种金属相接触，都是位序在前的一种带正电，后面的一种带负电。这就是著名的伏打序列。

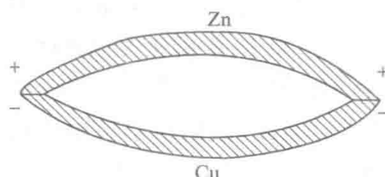


图2-33　两种金属接触就会产生电

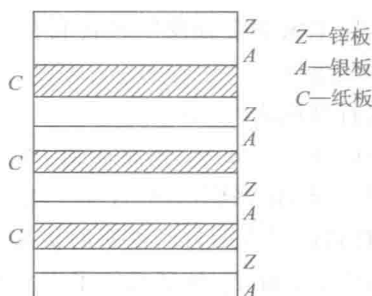


图2-34　伏打电堆的原理

伏打将两块不同的第一类导体与浸有第二类导体溶液的湿布接触，再用导线将这两块第一类导体连接起来，成一回路，便得到虽然微弱但很稳定的电流。他把这个装置叫作伽伐尼电池。当把若干个这种电池串接起来时，就能得到较强的电流(图2-34)。

例如，伏打把40对或60对圆形的铜片和锌片相间地叠起来，每一对铜锌片之间放上一块用盐水浸湿的麻布片。这时只要将两条金属线分别与顶面上的锌片和底面上的铜片焊接起来，则两金属端点就会产生几伏的电压(图2-35)。把铜片换成银片效果更好。金属片对数越多，电力越强。这样产生的电流不仅相当强，而且非常稳定，可供人们研究其他的电学问题时使用。后来人们把伏打发明的这种电源装置叫作



图2-35　伏打电堆

“伏打电堆”。1800 年,伏打给英国皇家学会写信,报告了他的电堆实验。从此以后,电学的研究便活跃起来了。

不久,伏打发现,随着两种金属片之间的湿布慢慢干燥,电堆产生的电流就渐趋微弱。于是他改用许多杯子,杯子都盛有盐水或稀酸,每个杯中插入一对锌片和铜片,然后用金属线把每个杯中的锌片和另一杯中的铜片焊接起来,便得到经久耐用、电流更强的电池。这种装置称为“杯冕”,正是历史上第一个实用电池。

伏打电堆是电学技术上的一项重大发明,它使人们第一次获得了比较强的且稳定而持续的电流,为科学家们从对静电的研究转入对动电的研究创造了条件,导致了电化学、电磁联系等一系列重大的科学发现,加深了人们对光、热、电磁、化学变化之间关系的认识。伏打电堆的发现还开辟了电力应用的广阔道路,由于它的诞生,19 世纪的第一年成了电气时代文明生活的开端。

奥斯特与电流的磁效应

奥斯特(1777—1851,图 2-36)于 1777 年 8 月 14 日出生在丹麦。1794 年,奥斯特考入哥本哈根大学,1799 年获博士学位。1801—1803 年,奥斯特去德、法等国访问,结识了许多物理学家和化学家。1806 年,奥斯特开始担任哥本哈根大学的物理学教授,1815 年起任丹麦皇家学会常务秘书。1820 年因电流磁效应这一杰出发现获英国皇家学会科普利奖章。1829 年起,奥斯特任哥本哈根工学院院长,1851 年 3 月 9 日在哥本哈根逝世。



图 2-36 奥斯特与电流磁效应的发现

在 18 世纪下半叶,因为法国物理学家库仑已经指出电和磁有本质上的区别,所以很少有人再会去考虑它们之间的联系。可是奥斯特一直相信电、磁、光、热等现象之间存在相互联系,尤其当他得知富兰克林发现莱顿瓶放电能使钢针磁化之后,更加坚定了自己的想法。当务之急是怎样找到实现这种转化的条件。奥斯特仔细地审视了库仑的研究情况,发现库仑研究的对象全是静电和静磁现象,确实不可能实现电与磁的转化。他应该把注意力集中到电流和磁体相互作用的课题上去。

在伏打电堆发明的推动下,奥斯特开始了电化学的研究。1812 年,奥斯特发表了《关于化学力和电力的同一性的研究》,总结了他关于电、伽伐尼电流、磁、光、

热及化学亲和力的研究成果,表明他已经将自然力统一的思想运用到物理学和化学的研究中去了。他从电流流经直径较小的导线时导线会生热的现象推测,如果通电导线的直径再小一些,就有可能发出光来;当导线的直径进一步缩小到一定程度时,电流或许就会产生磁效应,这就是他关于电流纵向磁效应的设想。他指出:"我们应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响"。寻找电力与磁力的联系的思想,一直萦绕在他的脑际。

由于教学任务繁重,特别是由于错误地设想电流的磁效应是纵向的,他的猜想一直未能证实。1819 年冬到 1820 年春,他在为一批已具有物理学基础的学者们讲授关于电学、伽伐尼电流和磁学的课程时,才有充分的时间来深入考虑电和磁的联系,并使他原来的"对电力和磁力的同一性的信念越发澄清起来"。他从许多人沿着电流的方向寻找磁效应都未获成功的事实中受到启示,抛弃了 1812 年的设想。他猜测,如果电流能够产生磁效应的话,这种效应很可能像电流通过导线时产生的热和光那样向四周散射,是一种侧(横)向作用,所以应当把磁针放在载流导线的上下左右来观察。

1820 年 4 月,奥斯特安排了一个实验:用一个小的伽伐尼电池,让电流通过直径很小的铂丝,铂丝下放置一个封闭在罩中的小磁针。这个实验由于一个意外事故未能在课前进行。在当晚的课堂上,他突然觉得实验有很大成功的把握,于是就把导线与磁针都沿磁子午线方向平行放置,毫不犹豫地接通了电源,果然小磁针向垂直于导线的方向偏转过去。这个现象并未给听众留下什么深刻的印象,但却使奥斯特激动万分,伟大的发现就这样产生了!通过接下来三个月共六十多次实验的持续研究,奥斯特终于在 1820 年 7 月 21 日以《关于磁体周围电冲突的实验》为题,发表了他极为简短的实验报告,叙述了他在友人参与下所做实验的结果。报告上记载:"在自由悬挂着的磁针上方,由北向南流动的伽伐尼电,把磁针的北端推向东,而在相同的方向上,在磁针下面流过的伽伐尼电,把磁针的北端推向西。"

奥斯特在实验中发现,使用不同种类的金属导体,如铂、金、银、黄铜、铁、铅丝、锡或水银,通电后都能使磁针偏转,只有程度上的差别;将玻璃、金属、木头、水、树脂、陶器、琥珀和石块等非磁性物质置于导线和磁针之间,效应不受影响。奥斯特把导体中及其周围空间发生的这种效应称为"电冲突"。他说:"电冲突只能对磁性粒子起作用。所有非磁性体看来都能让这种电冲突通过,但磁性物质或磁性粒子则阻抗这种电冲突通过,因而它们就为冲突所产生的冲力带动而发生运动。"奥斯特特别指出,"电冲突不是封闭在导体里面的,而是同时扩散到周围空间"。观察还表明,"这种冲突呈现为圆形,否则就不可能解释这种情形:当连接的

导线的一段放在磁极的下面时，磁极被推向东方；而当置于磁极上面时，它则被推向西方。其原因是，只有圆才具有这样的性质，其相反部分的运动具有相反的方向。此外，沿着导线长度方向连续前进的圆形运动必然形成蜗线或螺旋线。”

继古希腊的泰勒斯之后，经过了 2 400 年之久，才由奥斯特真正建立起电和磁之间的联系，开创了电磁学的新时代。

奥斯特的发现在科学界刮起了一阵“旋风”，长期以来，人们信奉的电和磁没有联系的观念被冲破了。一些有敏锐眼光的科学家，特别是一些法国科学家在接下来很短的时间内便奠定了电流磁效应的基础。

“电学中的牛顿”——安培



图 2-37　安培像

安培(1775—1836，图 2-37)于 1775 年 1 月 20 日出生在里昂的一个富商家庭。安培小时候记忆力极强，数学才能出众。他父亲在卢梭教育思想的影响下，决定让安培自学，并经常带他到图书馆看书。安培自学了《科学史》和《百科全书》等著作。他对数学最着迷，13 岁就发表了第一篇论述螺旋线的数学论文。1799 年，安培进入法国里昂的一所中学教数学。1802 年 2 月，安培离开里昂去布尔格学院讲授物理学和化学，4 月他发表了一篇论述赌博现象的数学论文，显露出极好的数学功底，引起了人们的注意。后来安培应聘在拿破仑创建的法国公学任职。1808 年安培任法国帝国大学总学监，1809 年任巴黎工业大学数学教授，1814 年当选为法国科学院院士，1824 年任法兰西学院实验物理学教授，1827 年当选为英国皇家学会会员。他还是柏林科学院与斯德哥尔摩科学院的院士。

1836 年，安培以大学学监的身份外出巡视工作，途中不幸染上急性肺炎，医治无效，于 6 月 10 日在马赛去世，终年 61 岁。后人为了纪念安培，用他的姓氏作为国际单位制中电流的单位，简称“安”。

奥斯特发现电流的磁效应后的两个月左右，这个物理学发展史上的惊世成果就传到了法国。法国的天文学家和物理学家阿拉果(1786—1853)于 1820 年 9 月 11 日第一次在法国科学院的报告会上演示了奥斯特实验，让法国科学界的同仁们了解到这项物理学最新的进展。阿拉果的报告立即在法国科学界引起了巨大的反响。

最积极和最迅速对此做出反应的就是安培，他在这股“电磁旋风”之前并没有从事过物理学研究的经历。有趣的是，在听了阿拉果报告后的第二天，安培就重

复了奥斯特的实验，并对此加以发展。通过进一步实验，他发现了一些影响更为深远的现象，提出了不少富有启发性的见解。在1820年9月18日、9月25日和10月9日法国科学院会议上，安培连续宣读了3篇重要论文，使电磁研究更加深入。

在9月18日的论文中，他在重复奥斯特实验后提出了圆形电流产生磁的可能性。此外，他还通过实验发现了磁针偏转方向与直线电流的方向之间服从右手螺旋法则的关系，后人称之为“安培定则”。除此之外，他在论文中还猜想地球的磁性是由从东向西绕地球做圆周运动的电流引起的。

在9月25日的论文中，安培写道：通过实验发现，不仅电流对磁针产生力的作用，电流与电流之间也存在力的作用。电流方向相同的两条平行载流导线互相吸引，电流方向相反的两条平行载流导线相互排斥。这比奥斯特的实验大大前进了一步。安培后来还据此提出了著名的分子电流假说，认为每个分子的圆形电流就像一枚小磁针，这就是物体表现出磁性的原因。历史上曾经将奥斯特的电流磁效应作为电磁学第一定律，而把安培的电流间存在相互作用力的结论作为电磁学第二定律。

在10月9日的论文中，安培介绍了不同形状的电流，如通电螺线管、圆电流之间的相互作用。

后来，安培在实验基础上运用数学方法总结出了电流之间作用力的定律，后人把这个定律称为安培定律。安培于1820年12月4日向科学院报告了他的研究内容。

为了把一切磁的现象都归结为电流间的相互作用，安培提出了著名的分子电流假说。既然螺线管的表现就像一根磁棒那样，安培就设想磁铁表面存在一层电流的环流。他的朋友菲涅耳提醒说，磁铁是非良导体，宏观电流将使磁铁发热，而且使电流很快消耗殆尽。接受了菲涅耳的建议，安培改而假设在磁性物质内存在无数微小的“分子电流”，它们永不衰竭地沿着闭合的路径流动，从而形成一个个小磁体，以此作为物体宏观磁性的内在根据。安培把这些电流当作基本的实体，从而否定了独立的“磁流体”存在的必要性。

安培的分子电流假说虽然有深远的意义，却是同当时的物理学原理相违背的。不仅宏观的电流会受电阻消耗，而且电荷的圆周运动会通过辐射而损失能量，因而不可能靠它来提供永恒的分子电流。到20世纪初，人们才明确认识到安培的分子电流无法容纳在经典物理学的框架之内，只有在量子理论的基础上才能得到解释。所以，安培的分子电流是一种超越了他的时代的假说。

这样，安培就把电磁学分为“静电学”和“电动力学”两部分，而把磁学视为电

动力学的一个分支,把磁相互作用归结为圆电流的相互作用。此外,安培还提出了"电压"(电动力)和"电流"的概念,并且指出所谓"电流的方向",都是指正电而言的。

安培是发展测电技术的第一人,他用自动转动的磁针制成测量电流的仪器,以后经过改进,成为电流计。

安培一生中只有很短的时期从事物理研究工作,可是他却以独特而透彻的分析论述了带电导线的磁效应,因此后人称安培是"电动力学的先驱"。

安培将他的研究综合在《电动力学现象的数学理论》一书中,该书成为电磁学史上一部重要的经典论著。麦克斯韦称赞安培的工作是"科学上最光辉的成就之一",还把安培誉为"电学中的牛顿"。

电磁学的初步应用

奥斯特和安培的发现为电磁学的应用开辟了道路。他们的发现刚一公布,就有人利用这一现象设计电动机了,还有人用来制作用于电学测量的灵敏仪器,像电流计和电压计的发明接踵而至。这些仪器的发明不仅提供了实际的应用,而且对物理学本身的发展也起到推动作用。

1825 年,一位名叫威廉·史脱琴的人表演了轰动一时的节目,他在马蹄形铁芯上绕了 38 匝铜丝。当他把一只铜锌电池的两极与线圈接通时,这只铁芯"居然"吸起了一块约 4 kg 重的铁制重物!这大约就是最早的电磁铁实物了。

在产生电磁铁之前,法国科学家盖-吕萨克首先观察到了铁块能被环绕它的通电线圈磁化的现象。后来,安培进一步指出,铁芯螺线管具有与条状磁铁类似的磁性特征,并将这样的螺线管称为电磁铁。

电磁铁诞生之后,它的重要性马上就被人们认识到了,于是,电磁铁在很多领域中开始大显身手。在现代工厂里,可以看到搬运重物的电磁起重机(图 2-38)。这种起重机可以举起和移动铁块,铁片、铁丝、铁钉、废铁和别的各种铁质材料,用其他方法来搬运都很麻烦,用了电磁起重机,就能不装箱不打包,很方便地搬来搬去。

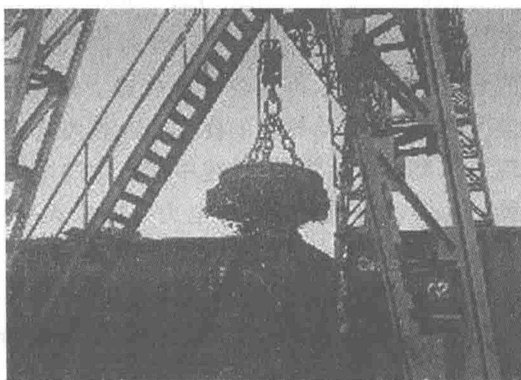


图 2-38　现代的电磁铁起重机

欧姆与欧姆定律

今天，只要是上过中学的人，鲜有不知道欧姆定律的。作为现代电学和电工学最基础的规律之一，它频繁地出现在初中和高中物理教材之中。但是，可以毫不夸张地说，绝大多数人提起欧姆定律的第一反应就是“$R=\frac{U}{I}$”这个数学公式，在他们看来，这个公式就是欧姆定律的全部了！如果追问一句：你知道谁是欧姆？他又是怎样发现这个定律的呢？恐怕就没有多少能够给出准确的回答了！

欧姆（1789—1854，图 2-39）出生在德国埃尔兰根一个锁匠家庭。欧姆的父亲是个技术熟练的锁匠，爱好数学和哲学，这使欧姆从小就受到良好的熏陶。父亲对他的技术启蒙使欧姆养成了动手的好习惯。物理学是一门实验学科，如果只会动脑不会动手，那么就好像是用一条腿走路，走不快也走不远。欧姆心灵手巧，木工、车工和钳工样样都能行，这有助于他获得日后的成就。


图 2-39　欧姆像

1805 年，欧姆进入德国的埃尔兰根大学，但在那里只学习了 3 个学期。此后去了瑞士，在瑞士的 4 年多时间里，他研读了一些著名科学家的著作。1811 年欧姆回到埃尔兰根大学复学，同年通过考核，获得博士学位，并开始了他的教师生涯。欧姆先后在普通中学、军事学校、高等学校教过数学和物理学，也当过私人教师。欧姆在科学上很有抱负，始终坚持研究工作，在电学、声学和光学上都有建树。

1817 年，欧姆开始电学研究时，最初的直流电源——伏打电堆已经诞生了近 20 年。当时热传导理论大行其道：假如导热杆中两点之间热流的大小与这两点的温度差成正比，再用数学推导建立热传导定律。在热传导现象中，两点之间的温度差，起着驱动热流的作用。欧姆从中受到很大的启发，认为电流现象和热流现象相类似。他猜想：导线中两点之间电流的大小也可能正比于这两点之间的某种驱动力，他把它称为“验电力”，即今天所说的电势差。欧姆做出很大努力对这个设想进行验证。

但是，欧姆通过实验手段发现欧姆定律的过程绝对不是一个简单的过程，因为在他那个时代还没有出现测量相关物理量的专门仪器，即便是当时使用的替代仪器，在测量精度上也远不及现在。这也就意味着欧姆需要解决的问题是非常多的，他面临着无数的困难！但是，正是这些困难将欧姆的智慧彰显得淋漓尽致。

欧姆所处的时代，并没有拿来就可以使用的便捷且电流输出稳定的电源。最早可以持续供电的伏打电堆并不能够给欧姆提供长时间稳定的电流输出，自然也就无法保证他顺利地进行后续的研究工作。1921年，德国物理学家赛贝克发现了温差电现象，也就是可以利用两个物体之间存在的温度差来产生电。依据温差电原理制作出来的温差电偶是一种不错的电源，可以输出稳定的电流。利用它，欧姆算是解决了第一个问题。

当时，同样没有现成的电流表。电流表是直接测量电路中电流大小的仪器，这是欧姆能够顺利研究下去必须要用到的重要仪器。面对困难，欧姆的智慧开始展现出来，他根据电流的磁效应制作了一个灵敏的磁力扭秤，以之来充当电流表的角色。所谓电流的磁效应，也就是丹麦物理学家奥斯特发现的电流周围会产生磁场的现象！电流周围会产生磁场，磁场的大小与电流的大小之间存在着某种比例关系，而这个磁场对放在其中的磁针会产生力的作用，这个力的大小又与磁场的大小有着一定的比例关系，如此一来，磁针所受到的力也就与电流的大小之间出现了对应的关系。

欧姆的设计十分巧妙，他将一枚小磁针用金属丝通过中点悬挂了起来，不工作的时候，小磁针保持平行于通电导线的状态。如此一来，当导线中有电流通过的时候，电流产生的磁场将会使这枚小磁针受到一个力，而这个力将使得小磁针旋转起来，小磁针的旋转必然带动悬挂它的金属丝发生扭转。

毫无疑问，人们马上就会想到，当这根金属丝被扭转的时候，其中马上会产生扭转弹力来阻碍这种扭转的发生，与那个小磁针受到的磁力抗衡。如此一来，小磁针最终将会停留在某一个位置上，在这个位置上磁力和扭转弹力产生的作用正好能够完全抵消，小磁针处于平衡。至于那个位置，具体直观的反映就是小磁针相对原来的位置扭转过的角度。很明显，这个角度的大小取决于磁力的大小，而磁力的大小归根结底就在于电流的大小。如此一来，借助于这个灵敏的扭秤，就可以用那个角度变化来反映对应导线中电流的大小变化了！

将不可测量的量用可测量的量、容易测量的量表征出来，就是一种转换与等效的思想！

有了可以提供稳定电流的温差电偶作为电源，有了灵敏的磁力扭秤来反映导线中的电流大小，欧姆开始进行他的实验研究。他选择了一组截面积相同而长度不同的铜导线作为外电路。对于铜导线来说，在截面积相同的情况下，其电阻的大小与长度之间存在着特定的关系。与此同时，为了便于更好地对比，欧姆在截取导线的时候，在长度方面也进行了处理，8根导线的长度分别是2,4,6,10,18,34,66,134英寸，它们的长度粗略地存在着一定的比例关系。

1826年1月8日、11日和15日，欧姆分别做了3次实验，得到了一系列的数据。通过分析这些数据，欧姆发现了一个有趣的现象：被测导线的长度越长，磁力扭秤的转角越小，角度之间的比例关系与导线长度之间的比例关系大体相当。

后来，欧姆又改变了温差电偶两极间的温度差（如此相当于使用了不同的电源），又做了一系列的实验，得到的数据同样具有上述规律。

1827年，欧姆完成了全部工作。他把自己的发现总结在《用数学推导伽伐尼电路》这本书中，这就是我们现在所熟悉的欧姆定律，只不过在当时欧姆所用的符号与现在的通用符号并不一样，而且当时欧姆得到的其实是全电路的欧姆定律。

遗憾的是，由于当时并不是所有的人都能够有条件获得稳定的电源和反应灵敏的电流测量仪器，在一段很长的时间内几乎没有人能够重复出欧姆的实验。因此，欧姆的发现也就没有及时受到重视，欧姆也没有因为自己的工作获得多少名望。

不过，随着电路研究工作的深入，越来越多的人逐渐认识到欧姆定律的重要性，这才使得欧姆本人渐渐有了一些知名度。1833年，欧姆终于被纽伦堡工艺学院聘为物理学教授。1841年，英国皇家学会授予他一枚勋章。1849年，他又成为慕尼黑大学的物理学教授。

到了1868年的时候，德国物理学家柯尔劳施进一步证明，欧姆定律不仅可以处理固体导线的问题，对于以电介质为外电路的情况，这个定律同样适用。如此一来，欧姆定律的价值被提升到了足够的程度。现在，为纪念他，电阻的单位正是以他的姓氏“欧姆”命名的。

自学成才的代表——法拉第

法拉第（1791—1867，图2-40），著名物理学家，1791年9月22日出生在英国伦敦的一个铁匠家庭中。幼年时因为家庭贫困只上过几年小学，但也因此获得了基本的读、写、算的能力。法拉第9岁的时候父亲去世，使得家境变得更加困难，为了生计，法拉第不得不离开学校开始自谋生路。他先是去一家文具店做学徒，13岁的时候到一家书店里当图书装订工。这个工作对于法拉第来说意义重大，因为这个工作使得他有了接触大量科学书籍的机会。从此，他开始了刻苦的自学生涯，为日后的发展积淀了厚实的基础。



图2-40　法拉第像

1812年，法拉第偶然获得了几张特别的听课票，使得他有机会听到了英国皇

家学会会长戴维做的几次化学讲座。每一次听讲座,法拉第都做了非常仔细而翔实的记录,讲座结束后他将几次的听讲记录经过精心的整理后装订成册,并附上精美的烫金封面,然后送给了戴维先生。看到这份特殊的礼物,戴维在惊喜之余被这个年轻人的精神感动,于是他约见了法拉第。

1813 年 3 月,在认可了法拉第的才能之后,戴维把他举荐到皇家研究所实验室做自己的实验助手。对于法拉第来说,这是他人生的转折点,从此他踏上了科学研究的道路。同年 10 月,戴维到欧洲大陆进行科学考察和讲学,法拉第作为他的秘书和助手随同前往。这个过程历时一年半,法拉第跟随戴维先后到过法国、瑞士、意大利、德国、比利时和荷兰等国家,不仅大大地拓宽了自己的科学视野,还结识了安培和盖-吕萨克等学者,为日后的发展积淀了丰富的知识基础和人脉关系。除此之外,法拉第在沿途协助戴维做了大量的化学实验,提升了自身的实验能力,为他后来独立开展实验研究工作奠定了基础。1815 年回国后,法拉第开始独自进行科学研究,并不断取得成果。1824 年 1 月,法拉第当选为英国皇家学会会员,1825 年 2 月任皇家研究所实验室主任(图 2-41)。1846 年,法拉第荣获伦福德奖章和皇家勋章。

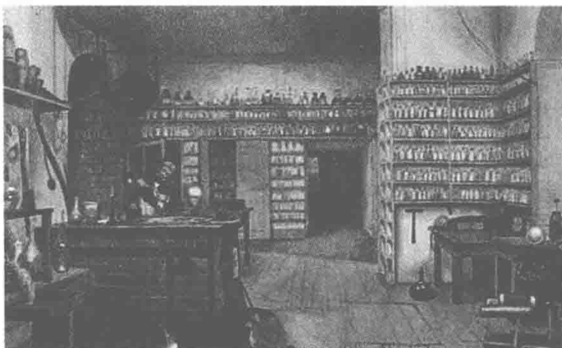


图 2-41　法拉第在实验室

法拉第一生在科学上有很多成就。1831 年,在经过约十年的不懈努力后,终于发现了电磁感应现象,进而确立了电磁感应定律。利用这一原理,他发明了人类历史上第一台感应发电机。1833—1834 年,法拉第研究了电流通过溶液时所发生的化学变化,发现了法拉第电解定律。为了正确描述实验事实,法拉第制定了迁移率、阴极、阳极、阴离子、阳离子、电解、电解质等许多概念和术语。1845 年,他又发现了一束光通过磁场时会发生旋转的“法拉第效应”。法拉第是电磁场理论的奠基人,他首先提出了磁力线(现定名为“磁感线”)和电力线(现定名为“电场线”)的概念,在电磁感应和电化学的研究中进一步深化和发展了“力线”概念,并第一次提出场的思想,建立了电场和磁场的概念,否定了超距作用观点。

由于过度劳累,法拉第晚年患上了严重的神经衰弱症。1867 年 8 月 25 日,这位伟大的科学家与世长辞。

法拉第发现电磁感应现象

1821 年,距奥斯特发现电流磁效应已经过去了整整一年的时间。这一年中,人们在相关方面的研究取得了很多的成果,英国《哲学杂志》的编辑邀请法拉第撰写一篇有关电磁学发展的综合述评,回顾总结一下那些成果。在几个月的调研之后,法拉第写出了《电磁学发展历史概况》一文。文章写完了,但事情却没有真正地结束,法拉第的兴趣被激发了起来,他对电磁学问题产生了一些有意思的想法。奥斯特的发现揭开了电磁研究的序幕,在对电磁学历史概况的考察之后,法拉第敏锐地意识到这一领域是科学的前沿,决心另辟新径开创新局面。他首先想到磁生电的问题,1822 年,他在日记中写道:“磁能生电吗?”

电磁联系问题的提出,使得法拉第的科学研究有了一个明确的目标。但他寻找这个现象也经过了漫长的探索和多次失败。早在 1822 年法拉第写下上面那句话的同时,他还记录下了几个不成功的尝试。在接下来的十年时间中,法拉第曾经由于冶炼不锈钢、改良光学玻璃和研究气体的液化而常常中断这一探索,但还是不时回到这个课题上。从他的日记中我们可以看到有明确记载的就有 3 次(1824 年 12 月 28 日,1825 年 11 月 28 日,1828 年 4 月 22 日),而每一次失败的记录都包括了一系列的实验。如 1825 年 11 月 28 日他的日记中涉及的几个实验如下:

实验 1:两根长 4 m 长的导线平行放置,用两张厚纸隔开,先把其中的一根导线接到电池的两端通电,再把另一根与电流计相连。电流计的指针没有发生任何转动。

实验 2:将空心螺线管接到电池的两极,把一根直导线引进螺线管,直导线两端与电流计相连,没有任何效应发生。

实验 3:将“实验 2”中的直导线与电池两极相连,螺线管与电流计连接,仍无任何效应。

实验 4:把两根导线互相缠绕着,先把其中的一根导线的两头接到电池上通电,把另一根导线的两头接到电流计上。没有观察到任何现象。

“失败乃成功之母”,无数次失败带给法拉第的是更加冷静的思考和深刻的反思,法拉第在对这些失败进行分析和总结之后,终于在 1831 年 8 月 29 日第一次观察到了磁产生电的现象。

1831 年 8 月 29 日,法拉第把一个直径为 0.875 英寸的软铁圆棒焊成一个外径为 6 英寸的铁圈,在铁圈的一边绕上 3 个螺线圈,每个螺线圈所用的铜线长约 24 英尺(1 英尺=0.304 8 m),直径 0.05 英寸。螺线圈之间以及它们和铁圈之间是绝缘的。3 个螺线圈依次套叠在铁圈上,占据了约 9 英寸的地方,它们之间既

可分开,也能合在一起使用。它们在图 2-42 中用 A 表示。再把总长约 60 英尺的同一种铜线分成两段,在铁圈的另一侧照样绕好,这就形成了和螺线管 A 走向相同的螺线管 B,它们的两头相距各有半英寸左右。用铜线把螺线管 B 和电流计连接起来,电流计离铁圈 3 英尺远。把 A 中的 3 个螺线圈首尾相接,形成一个长螺线管,其两端和一个有 14 对 4 英寸×4 英寸极板的电池组相连。当接通电源时,立即出现了电流计的偏转。但电源接通之后,效应又消失了,指针立即摆回到原位置。切断电源时,指针再一次大幅度偏转,但偏转方向与开始相反。对于这个偶然的发现,法拉第意识到这就是他寻找了近十年的磁的电效应。

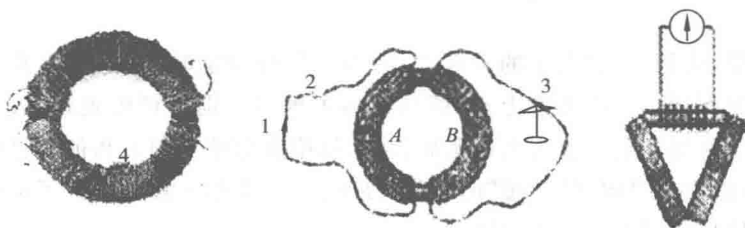


图 2-42　法拉第绕制的电磁感应线圈

在这个实验之后,法拉第的一系列实验都得到了同样的效果。比如,不用线圈 B,把电流计和 A 的一个螺线圈相连。将另外两个螺线圈合成一个螺线管,让电流通过这个螺线管,也产生了类似但更强的效应。经过这样一系列实验,法拉第于 1831 年 11 月 24 日向英国皇家学会提交了研究报告。在报告中,他将这一现象定名为“电磁感应”,并将产生电流的条件概括为 5 类:变化着的电场、变化着的磁场、运动着的稳定电流、运动的磁铁、在磁场中运动的导体。

法拉第对科学坚韧不拔的探索精神,为人类文明进步纯朴无私的献身精神,连同他的杰出的科学贡献,永远为后人敬仰。

跑得“太慢”的科拉顿和沮丧的亨利

其实,探寻磁生电的道路上并不是只有法拉第一个人。事实上,在奥斯特公布了电流的磁效应后,实现“磁生电”是当时许多科学家的愿望,如安培和科拉顿等人都曾为之努力过,但是都失败了。在这个问题上,最令人遗憾的莫过于科拉顿。

1825 年,科拉顿将一个磁铁插入连有灵敏电流计的螺旋线圈,观察在线圈中是否有电流产生。在实验时,科拉顿为了排除磁铁移动对灵敏电流计的影响,通过很长的导线把接在螺旋线圈上的灵敏电流计放到另一间房里。他想,反正产生的电流应该是“稳定”的(当时科学界都认为利用磁场产生的电应该是“稳定”的),插入磁铁后,如果有电流,跑到另一间房里观察也来得及。就这样,科拉顿开始了

实验。然而，无论他跑得多快，看到电流计的指针都指在“0”刻度的位置。科拉顿的实验失败了！科拉顿的失败是什么性质的失败呢？后人有各种各样的议论。

有人说，这是一次“成功的失败”。因为科拉顿的实验装置设计得完全正确，如果磁铁的磁性足够强，导线电阻不大，电流计十分灵敏，那么在科拉顿将磁铁插入螺旋线圈时，电流计的指针确实是摆动了的。也就是说，实验是成功的，只不过科拉顿跑得“太慢”，连电流计指针往回摆也没看见！

有人说，这是一次“遗憾的失败”。科拉顿如果有个助手在另外那间房里，或者科拉顿把电流计放在同一间房里看得见的地方，那么成功的桂冠肯定是属于科拉顿的。

有人说，这是一次“真正的失败”。因为科拉顿没能转变思想，没有从“稳态”的猜想转变到“暂态”的考虑上来，所以他想不到请个助手帮忙观察，或者把电流计拿到同一间房里来。事实也正是如此，法拉第在总结了别人和他自己以前失败的教训后，决定不再固守“稳态”的思想，终于在 1831 年 8 月观察到了电磁感应现象。科拉顿只能留下永远的遗憾。

美国物理学家亨利(1799—1878)在这一时期同样提出了磁能不能产生电的问题。1829 年他在实验电磁铁的提举力并用这种装置进行电报机的早期实验时，意外地发现通电线圈在断开时产生了强烈的电火花。1830 年 8 月，他继续对这一现象进行研究。他将一个线圈连接到电流计上，把线圈放在蹄形电磁铁的两端之间，发现在电磁铁接通和断开电流时，电流计的指针都会突然发生偏转。由于繁重的教学工作，他的实验一度停顿下来。直到 1832 年 7 月他才发表了一篇论文，叙述了他在听到法拉第的工作以前和以后所做的实验。

在法拉第关于电磁感应现象的论文发表以后 3 个月，亨利无意中得到了一本杂志，上面刊登了一篇介绍法拉第研究成果的报道。这篇文章使亨利感到极度沮丧。原来这正是他早在一年以前就发现的现象，但是他没有发表。早期的训练使他做事过于谨慎，他一直在等待着能够积累更多的资料。到了晚年，亨利对他的这次延误更是追悔莫及。

亨利在 1837 年访问了欧洲，与法拉第共同度过了许多日子。法拉第当时想到一个简单的实验，以使温差电偶产生火花。他把电偶的一端置于炽热的火炉上，另一端埋在冰块里，同时使另外两根线头相碰，但并未得到预想的结果。这时亨利走了过来，当时的报道是这样写的：“他把一段导线绕在自己的手指上，然后取下来，再套到一根铁棒上。然后他把这个线圈接到温差电偶的一根引线上，再使两根线头相碰，顿时爆出了耀眼的电火花。法拉第于是对亨利的实验大加赞赏，他大声问道：‘你到底是怎么成功的？’于是亨利不得不向这位因为发现电磁感

应而闻名于世的人解释自感应的道理。"原来,亨利在 1832 年发表的论文中就已经描述了这种自感应现象,但显然没有一个欧洲人读过它。

电磁感应可分为自感应和互感应。所谓自感应,就是回路中因自身电流变化而引起感应电动势的现象;互感应则是由于其他电路中的电流变化在回路中引起感应电动势的现象。亨利的工作,使得人们对电磁感应现象的认识又向前跨进了一步。

楞次的发现

法拉第发现了电磁感应现象,但他并没有很好地解决这个现象中产生的电流也就是感应电流的方向问题,而对于一个电路来讲,电流的方向是很重要的。俄国物理学家楞次(1804—1865,图 2-43)于 1833 年在名为《论动电感应引起的电流方向》的论文中对感应电流方向给出了明确的表述,也就是所谓的"楞次定律"。楞次定律表明,感应电流的方向总要使得它所产生的磁场阻碍引起感应电流产生的原先那个磁场的变化。楞次定律揭示了电磁现象中的一种"惯性"现象,是能量守恒定律在电磁感应现象中的具体体现。



图 2-43　楞次像

楞次于 1804 年 2 月 24 日出生在爱沙尼亚,16 岁的时候就以非常优异的成绩考入家乡的道帕特大学。1828 年,只有 24 岁的楞次就被俄国圣彼得堡科学院挑选为初级科学助理,1830 年被选为圣彼得堡科学院通讯院士,1834 年则当选为院士。他曾长期担任圣彼得堡大学物理数学系主任,后来由教授会选为校长。

楞次在物理学上的主要成就是发现了楞次定律和有关电热效应的焦耳-楞次定律。1833 年,楞次在圣彼得堡科学院宣读了题为《论动电感应引起的电流方向》的论文,正式公开发表了楞次定律。后来,著名物理学家亥姆霍兹(1821—1894)通过严格的数学推导,证明楞次定律其实正是电磁现象能量守恒特征的表现形式。

1865 年冬天,楞次在意大利罗马中风去世。

"力线"和"场"的初步思想

奥斯特的发现,在欧洲大陆导致了有精美数学形式的超距论电动力学(以安培为代表)的发展;而在英国,却以物理直观的形式,发展起了近距作用的场论思想,孕育出物理学观念和理论的一场重大革命。这个理论是由学徒出身的物理学

家法拉第首先创立的。

奥斯特效应和电磁转动效应的发现，在法拉第场思想的形成过程中，产生了最重要的直接影响。1821 年法拉第写道："我发现通常小磁针被导线的排斥和吸引只是一种假象，针的运动不是吸引也不是排斥，也不是任何引力和斥力的结果，而是由于导线中力的结果，这种力并不吸引或排斥磁极，而是使磁极绕着一个闭合的圆周运动。"在法拉第看来，这种圆周力是非常简单和优美的，而且能够用于电磁现象的解释。这里已经表现出法拉第对安培的超距作用中心力理论的怀疑。

1831 年 11 月和 1832 年 1 月，法拉第相应于他所发现的"伏打电感应"和"磁电感应"现象，提出了"电紧张态"和"磁力线"两个新概念。

法拉第认为，"电紧张态"是由电流或磁体产生的存在于物体和空间中的张力状态，这种状态的出现、变化和消失，都会使处于这种状态中的导体感应出电流来。他说："一旦导线受到伏打电流或磁的感应，它就显出一种特殊状态，因为它阻止其中电流的形成。"

"磁力线"则是法拉第为了对磁体和螺线管之间的相对运动产生感生电流的现象进行解释而提出的一个概念。但是他很快就把这个概念扩大到伏打电感应的情况，认为电流的变化也会引起磁力线的变化，因而磁力线也就成了对"电紧张态"做定量描绘的一个工具。磁力线的疏密表示这种状态的强弱，磁力线数量的变化表示这种状态的变化，这就为感生电流找到了一种量度方法，并通过磁力线概念把"伏打电感应"和"磁电感应"统一起来，用"切割磁力线产生电流"对电磁感应定律做出了物理的概括和解释。"磁力线"概念的提出成为他发展自己的力场理论的立足点。

不久，法拉第又引入了"电力线"的概念，设想电力也像磁力一样是通过力线传播的(图 2-44)。

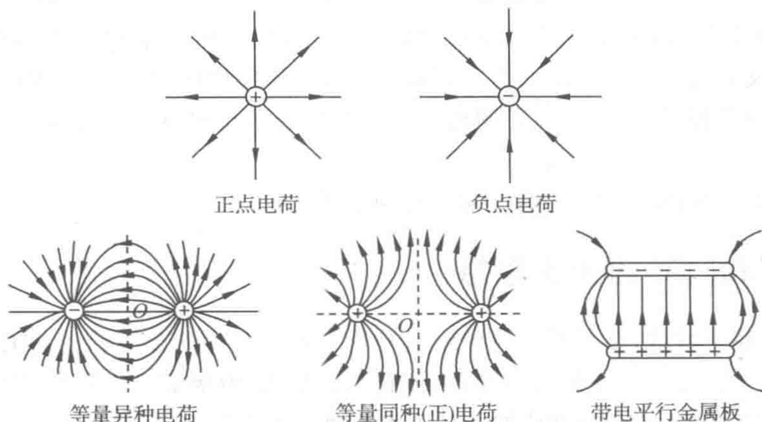


图 2-44　常见的电场线(即"电力线")

对电解过程的研究使法拉第取得了一个有革命意义的发现。从伏打电池发明以来,电化学家们一直认为,电路的正端和负端像中心力的力心那样起作用,这个力通过一定的距离作用在电解质中的分子上而使分子中的不同成分“扯离”开来,这是一种超距作用的效应。法拉第通过研究指出,电解产生于电解质内部分子的作用和变化,而不是外部电极超距的吸引作用引起的。电流的通过使分子中由电的张力激起的化学亲和力的形式发生改变,使得对于分子中的每种成分而言,化学亲和力在一个方向的作用比在另一个方向的作用强,因而使分子中的两种成分形成一种极化状态并随之分解开来,每种成分又和邻近分子中的另一成分结合成分子。通过溶液中分子发生的一连串分解和复合的过程,不同成分向相反方向移动,最后在端点处被析出。

1837 年,法拉第在研究介质如何影响电力时发现:用一块绝缘材料隔开的两个导体板组成的电容器,比由真空隔开的电容器能够容纳更多的电荷量;而板间所夹的物质不同,电容器容纳的电量也不同。他把夹有绝缘材料时和真空时电容器所容电量的比值称为该材料的电容率(即介电常数)。为了解释这个现象,他假设在绝缘体中进行着与电解质中相同的过程,介质中的分子产生了某种极化状态;两金属板上的电荷并不是超越它们之间的空间直接发生作用的,而是借助于两板之间的电介质内相互邻近的极化分子的作用逐点传递过去的,中间介质在这种相互作用中起着重要的作用。法拉第很自然地把介质分子的这种极化状态推广到真空中“以太粒子”的形变上,这种形变是沿曲线传播的,由此明确引入了“力线”的概念。他设想,在电容板之间的绝缘介质中,电力线要比真空中稠密一些,其稠密程度与材料的电容率成正比,因此就在电力线尽头的电容板上容纳较多的电荷。这里说的“以太”就是以前科学家假想的能传递各种力的粒子。

1845 年 9 月,法拉第进行的磁力通过重玻璃而使光的偏振平面发生偏转的实验,使他领悟到磁力不能被局限于铁、镍、钴等少数物质,而应能够对所有物质发生作用。1845 年 11 月,他用强电磁铁进行实验时发现,物质对磁力的作用类似于介质对电力的作用。当把各种材料的物质做成条形时,多数物质(如重玻璃、铜棒、铋条、木块、橡皮等)转向与磁力线交叉(即垂直)的方向,并且移向磁力较弱的地方;只有铁、镍等物质取与磁力线一致的方向,并移向磁力最强的地方。他把前者称为“抗磁体”,后者称为“顺磁体”。对于这个现象,大多数物理学家是根据“磁流质”假设以“极分子”的存在来解释的。他们认为,磁体在抗磁体中引起的磁感应与顺磁体中的恰好相反,从而使抗磁体的极性与磁体发生排斥。法拉第对这种解释是怀疑的,他相信,在顺磁体和抗磁体中都不存在作为磁力线的终点的“磁极”,而只是对磁力线的不同反应。磁力线很容易通过磁性物质,所以在顺磁体中

是密集的;而抗磁体则是磁力线的不良导体,所以磁力线趋于绕过抗磁体,使其中的磁力线变得稀疏。但是,无论是在顺磁体或抗磁体中,磁力线都是连续的曲线,不存在作为"磁极"的力线的终点。

所有这些工作,都使法拉第更加坚信,电和磁的作用不是没有中介地从一个物体传到另一个物体。他设想,在带电体、磁体和电流周围的空间存在着某种由电或磁产生的像"以太"那样的连续介质,起着传递电力和磁力的媒介作用,并把它们分别称为"电场"和"磁场"。这是物理学发展史中第一次提出作为近距作用的"场"的概念。

1851 年 12 月,法拉第发表了《论磁力线》一文,在文中他类比于流体场对场的物理图景做了直观的描述。他提出,场是由力线组成的,许多力线组成一个力管,它们将相反的电荷和磁极联系起来。力线上任一点的切线方向就是该点场强的方向,力线的疏密程度则表示不同点场强的大小。力管有纵向收缩的趋势和横向扩张的趋势,他以力管的这种机械性质解释了异性相吸和同性相斥现象。因此,法拉第认为,力线具有物理实在的性质,它是场的表象。他在一张纸上撒满铁屑,用磁棒在其下面轻轻振动,铁屑就清楚地连接成规则的曲线,法拉第以此来证明力线和力管的实在性。

这样,法拉第就从带电体和磁体周围媒质的作用,也就是从电场和磁场的观点出发去考察一切电磁作用过程。他关于力线和场的概念对传统的科学观念是一个重大突破,把近距媒递作用观念引进了物理学中,对于电磁学以及整个物理学的发展都产生了深远的影响。所以,著名物理学家劳厄(1879—1960)把法拉第誉为"正确理解电磁现象的带路人"。

法拉第的期盼与兴奋

法拉第发现了电磁感应现象之后,继续在这个领域中进行着更深入的研究。由于他的数学基础差,当他研究到电感应和磁感应的传播问题时,尚不能完整地表达出自己的新思想,于是就把自己的想法先简单地写了出来,存放在皇家研究院的保险箱里,希望有一天有人能够明白其中的想法。但是,23 年过去了,依然无人涉足这个领域,而此时的法拉第已经垂垂老矣。想到自己的想法也许要 100 年才会被人们接受和认同,心里不觉有点凄然,他感慨地说:"那个时候我也许是看不见了!"正当法拉第叹息不已的时候,桌上一份新出版的杂志上一篇文章的标题——《论法拉第的力线》吸引了他。法拉第认真阅读了这篇文章,觉得这篇文章的作者正是他等待了多年的知音,不由感慨:"哈哈,我的理论终于后继有人了!"

1860 年,70 岁高龄的法拉第在自己的家中会见了这位知音——比他年轻 40 岁

的麦克斯韦。法拉第兴奋地对麦克斯韦说:"当我知道你用数学来构造这一主题，起初我几乎吓坏了，我惊讶地看到，你处理得如此之好!""先生能给我指出论文的缺点吗?"麦克斯韦腼腆地说。"这是一篇出色的文章，"法拉第想了想，说，"可是你不应该停留在用数学来解释我的观点，而应该突破它。"这句话鼓励了麦克斯韦，他不懈地努力，终于在 1865 年建立了完整的电磁场理论方程。

1867 年 8 月 25 日，幸运的法拉第在看到了自己的理论后继有人、经典电磁学理论大厦完全竣工之后，坐在椅子上平静地离开了人世。

麦克斯韦与电磁场理论

麦克斯韦(1831—1879，图 2-45)于 1831 年 11 月 13 日出生在苏格兰名城爱丁堡。麦克斯韦 8 岁那年，母亲去世，但在父亲深情的照料和详尽的指导下，求知欲旺盛的麦克斯韦的童年仍然是美好的。10 岁时，他进入爱丁堡中学读书，衣着土里土气和带着浓重的乡下口音的麦克斯韦，在班里免不了受到出身名门的富家子弟的嘲笑、欺侮。但是，他十分顽强，勤奋学习，不受干扰，很快就显示出了自己的才华，扭转了别人对他的看法。他在全校的数学竞赛和诗歌比赛中都取得了第一名的成绩，成了有名的"神童"。"神童"不是天生的，是强烈求知和刻苦学习的结果。



图 2-45　麦克斯韦像

在中学时，麦克斯韦更是表现出了过人的思考能力，15 岁那年就写出一篇数学论文，发表在《爱丁堡皇家学会学报》上，论文的内容是讨论二次曲线的几何作图。1850 年，麦克斯韦考入剑桥大学三一学院(189 年前牛顿进入这里学习)，主攻数学和物理学。在剑桥期间，他对色彩的感知做了一些有趣的研究，并且用数学证明了土星环不可能是刚性的固体物质，这充分展现了麦克斯韦作为一个数学物理学家的杰出才能。

人们对电磁理论的认识就像是一场接力跑，从奥斯特和安培发现电流的磁效应开始，经过法拉第的奠基，直到最后理论的完成，前后共经历了半个多世纪，而这一理论的集大成者正是麦克斯韦。

1855 年，24 岁的麦克斯韦发表了《论法拉第的力线》一文，这是他第一篇关于电磁学的论文。在论文中，麦克斯韦第一次将法拉第的电力线概念赋予数学形式，从而初步建立了电与磁之间的数学关系。《论法拉第的力线》一文虽然是用数学工具对法拉第的力线概念进行再解释，但却是非常重要的一步，因为经过这种

解释后法拉第的力线概念就由一种直观的想象上升为一种科学的理论。

1862 年，麦克斯韦发表了他的第二篇电磁学论文《论物理的力线》。这篇论文与 1855 年的《论法拉第的力线》一文相比，有了质的飞跃。论文不再是法拉第观点单纯的数学表述，而是做了重大的引申和发展。在这篇论文中，麦克斯韦提出了自己首创的“位移电流”和“电磁场”的概念，并以此为基础给出了电磁场理论更完整的数学表述。麦克斯韦还预见了电磁波的存在。他认为，变化的电场必激发磁场，变化的磁场又激发电场，这种变化着的电场和磁场共同构成了统一的电磁场。电磁场以横波的形式在空间传播，形成所谓的电磁波。麦克斯韦做出这一预见时，年仅 31 岁。

1865 年，麦克斯韦发表了第三篇电磁学论文《电磁场动力学》。在这篇论文中，麦克斯韦应用数学方法推算出了电磁波的传播速度，并断定光也是一种电磁波。法拉第当年关于光与电磁关系的朦胧猜想，就这样由麦克斯韦变成了科学的推论。1873 年，麦克斯韦的著作《电磁学通论》正式出版。这部伟大的著作足以与牛顿的《自然哲学的数学原理》和达尔文的《物种起源》相比，是人类思想最宝贵的结晶。

1856 年，麦克斯韦到阿伯丁的马里沙尔学院任自然哲学教授，1860 年到伦敦任皇家学院自然哲学及天文学教授。1865 年辞职还乡，专心治学和著述。1871 年受聘为剑桥大学的实验物理学教授，负责筹建该校第一所物理学实验室——卡文迪许实验室（图 2-46、图 2-47），并担任首任主任。

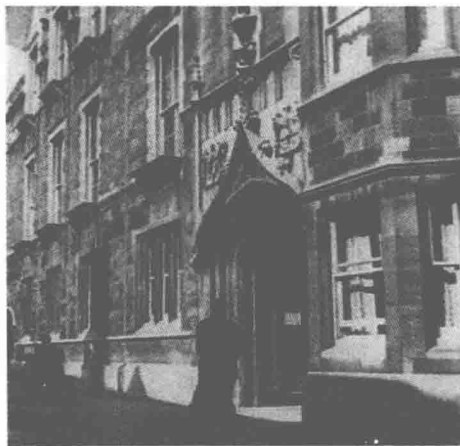


图 2-46　曾经的卡文迪许实验室

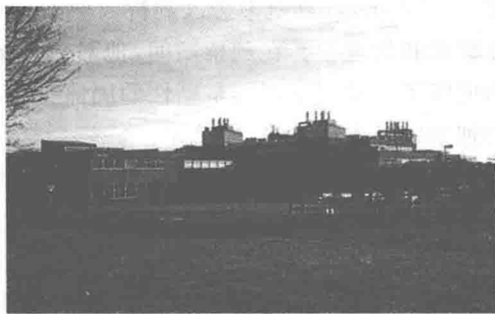


图 2-47　新的卡文迪许实验室

建成后的卡文迪许物理实验室对整个实验物理学的发展产生了极为重要的影响，培养了众多著名的物理学家，其中不乏诺贝尔奖得主。卡文迪许实验室甚

至被誉为“诺贝尔奖获得者的摇篮”。作为该实验室的第一任主任，麦克斯韦在1871年的就职演说中对实验室未来的教学方针和研究精神做了精彩的论述。这个演说是科学史上一个重要的演说。麦克斯韦的本行是理论物理学，但他却清楚地知道实验称雄的时代还没有过去。他批评当时英国的“粉笔”物理学，呼吁加强实验物理学的研究及其在大学教育中的作用，为后世阐发和宣扬了实验科学精神。

1879年是麦克斯韦生命中最后的一年。这一年的春天来得很晚，天气格外寒冷。他的健康已经明显恶化，可是仍然坚持工作，不懈地宣传电磁理论。他的讲座这时仅有两名听众，一名是来自美国的研究生，另一名是后来发明了电子二极管的弗莱明。空旷的教室里，只有第一排坐着两名学生。麦克斯韦走上讲台，面向两名学生解释自己的理论。

1879年11月5日，麦克斯韦因肺病不幸去世，年仅49岁。他的理论为近代科技开辟了一条崭新的道路。当我们意识到今日的文明社会被电磁波笼罩时，我们不能不想到这位伟大的数学物理学家。

证实电磁波存在的赫兹

赫兹(1857—1894，图2-48)是德国著名的物理学家，1857年2月22日出生于德国汉堡的一个富有家庭。年轻的赫兹勤奋好学，在数学和物理实验方面显示了出众的才能。早在少年时期，赫兹就表现出了对实验的兴趣，12岁的赫兹就有了属于自己的木工工具和工作台，后来还有了车床，利用这些工具他经常制造一些简单的实验仪器进行有意思的小实验。1876年，赫兹考入德累斯顿工学院学习工程，但是很短的时间之后他就离开了那里，进入铁路军团服役一年。1877年，他考入了慕尼黑大学，学习数理科学。第二年又转入柏林大学，在亥姆霍兹教授的指导下学习并进行研究工作。1879年获金质奖章，1880年他以纯理论性的《旋转导体电磁感应》论文获得博士学位，随后便成为亥姆霍兹的助手。1883年到基尔大学任教。1885—1889年任卡尔斯鲁厄大学物理学教授，1886年开始进行使他闻名世界的关于电磁波的实验工作。


图2-48 赫兹像

1887年，赫兹用自己设计的振荡器第一次通过实验证实了电磁波的存在，有力证明了麦克斯韦电磁波理论的正确性，后来他又研究了电磁波的各种性质，证实了电磁波在空气中的传播速度等于光速，确立了电磁波和光波基本特性的等同

性。1889年，赫兹接替克劳修斯担任波恩大学物理学教授。赫兹曾多次获得意、法、德等国家科学院和学术团体的奖章和奖金，并被选为柏林科学院、剑桥哲学学会等7个主要学术组织的通讯会员。正当人们期盼他再做贡献的时候，病魔却夺去了他的生命。赫兹于1894年元旦去世，年仅37岁。他的导师亥姆霍兹赞扬赫兹："才气横溢，性格坚毅，用自己短暂的一生解决了一个世纪以来许多科学家所没有解决的一系列重要的问题。"

据说，在1878年夏季，柏林大学物理学教授亥姆霍兹向学生们提出了一个竞赛题目，要他们用实验方法来验证麦克斯韦电磁理论。当时，作为亥姆霍兹学生的赫兹自然也接受了这个任务，从此开始了用实验手段验证麦克斯韦电磁波理论正确性的征程。建立一个具有足够功率的电磁波源，是获得电磁波的前提。在亥姆霍兹的指导下，赫兹很快就制成了电磁波辐射源，当时被称为"赫兹振荡器"。当实验设备齐全之后，赫兹投入了紧张的实验过程之中。不过，在开始的几年中，实验虽然开展了很多次，但令人遗憾的是并没有取得成功。

1885年，赫兹应聘到卡尔斯鲁厄大学担任物理学教授。作为卡尔斯鲁厄大学的年轻教授，赫兹每周有二十几节课的教学任务，这使得他只能抓紧课余的每一点时间进行实验。

每当下课，赫兹就急忙将几页记录纸准备好，焦急地等待最后一个学生离开教室。这时离下一节课还有三个小时，这段时间应该好好地利用。他招呼一直在等待他的技师卡尔，两人很快将把教室的讲台改装成临时的实验台，这里其实就是赫兹能够进行实验的唯一场所，因为学校能够提供给他的地方实在是太有限了。赫兹先检查了谐振器，将谐振器放到与振荡器有一定距离的地方。实验开始后，赫兹和技师立刻忙碌起来，往往一个多小时过去了，他们还没有观察到迸发出的火花。他们疲惫不堪地坐在桌子的旁边。赫兹已经记不得这是第多少次失败了。

1886年秋季的一天，赫兹又在进行火花放电实验，一个奇异现象引起了他的注意：每当放电线圈放电时，附近几米外的另一个开口的绝缘线圈中竟会迸发出一束小火花。这个发现让赫兹的脑海中灵光一闪，这不就是他苦苦寻觅了很久的东西吗！根据麦克斯韦的电磁波理论，这跳跃的小火花不正意味着电磁波在空间传播吗！有了一次成功，接下来的成功就容易多了，赫兹在反复实验并总结了实验的体会之后，成功地写出了《论绝缘体中的电过程所引起的感应现象》一文，并把这篇论文首先寄给他的老师亥姆霍兹。

赫兹接着又成功用实验证实了电磁波具有反射、折射、衍射和干涉等性质。此外，赫兹还发现改变接收器和发送器之间的距离时接收器气隙间的火花会周期

性地增强和减弱，于是他利用这个现象测量了电磁波的波长。后来又测量了电磁波的速度，果然与光的速度相同！这就证实了麦克斯韦“光是一种电磁波”的预言。赫兹于1888年1月将这些进一步的成果总结在题为《论动力学效应的传播速度》一文中。

赫兹的实验公布后，全世界许多实验室立即重复了他的实验。“赫兹波”成了当时物理学家口头常用的词汇。赫兹的发现不仅证实了麦克斯韦电磁理论的正确性，并且也为人类利用电磁波打下了基础，开创了电子技术新时代。

电磁波的应用

赫兹用实验验证了电磁波存在以后，没有进一步去探索电磁波的应用，反而否定了电磁波为人类服务的可能，他还断言，电磁波“没有什么用处”。可是，有两位年轻人却从赫兹实验的小火花中，看到了它实际应用的广阔前景，并信心百倍地投入到利用电磁波来进行通信的研究工作中去。

1889年春，当时在一所俄国军事学校里教书的波波夫，在参加一次理化协会的会议时看到了赫兹实验的表演。波波夫并不同意赫兹“电磁波无用”的观点，他认为，将来的电波也可能像光波一样，在天空中传播出去。为此，他经过几年不懈的努力，制造出第一台无线电接收器。

1895年5月7日，波波夫在彼得堡举行的一次科学会议期间，向代表们演示了这台仪器。在演示的过程中，它成功地接收到了由雷电产生的电磁波。紧接着，波波夫又对其加以改进，研制了一套可以真正用于通信的发射装置和接收装置。

1896年3月24日，波波夫在250 m的距离内发射了世界上第一份无线电报，并由接收机上的一个莫尔斯电码记录器记录了下来，电文是“海因利茨·赫兹”。波波夫以这样的形式肯定了这位发现电磁波的先驱的功绩。

几乎在和波波夫同时，意大利青年工程师马可尼(1874—1937)也对赫兹实验产生了兴趣，试着摸索出一条实现无线电通信的道路。

马可尼想，假如加强电磁波的发射能力，也许能增大它的传播距离。他在自家的菜园子里完成了几百米距离的无线电通信试验后，又持续干了10年，终于在1895年成功进行了2 000 m距离的无线电通信试验。在这次试验中，他采用接地天线的方法来加强电磁波的发射能力。

马可尼发明了无线电通信技术后，要求意大利政府资助。但当时的意大利政府对此很不重视，马可尼的要求被拒绝了。于是，马可尼不得不求助于比较注重技术发明的英国。英国海军部十分重视他的发明，认为无线电通信技术一旦成功

应用，便可解决英国舰队当时存在的指挥调动难题，于是便大力资助马可尼的研究。不久，马可尼在一次公开表演中，成功地进行了 12 km 距离的无线电通信试验。1899 年 3 月，他又出色地完成了英国和法国海岸间相隔 45 km 的无线电通信试验。

现在，他要向更宏伟的目标进军了。马可尼大胆地提出了横跨大西洋的无线电通信计划。许多人对此深表怀疑：在通过大西洋 3 700 km 的遥远距离之后，电磁波是否还能收到？

马可尼在 1901 年 12 月开始实施他的计划。他在英国的康沃尔建立了一个装备有大功率发射机和先进天线设备的发射台；然后带着一名助手来到大西洋彼岸的加拿大圣约翰斯，那是预定的接收地点。他们首先安装起信号接收装置，然后用氢气球把天线高高吊起。突然，氢气球爆炸了，整个计划出现了夭折的危险。

约定的时间到了，在英国康沃尔的发射台，从 12 月 5 日起，开始连续使用 60 m 高的天线发射无线电波。加拿大这里却还是乱成一团，直到 12 月 12 日，马可尼才急中生智，想出了办法：用大风筝把天线升到了 121 m 的高空。马上，他们收到了英国发出的事先商定好的莫尔斯电码“S”。

这个消息马上传遍了欧美各地，各家报纸都以特大标题登载：“电波征服了地球！横跨大西洋的无线电报发明成功！”

马可尼虽然在公开实验无线电通信上稍晚于波波夫，但他在发展提高无线电通信的距离方面，却做出了杰出的贡献。为此，他获得了 1909 年诺贝尔物理学奖，这时他才 35 岁。

三、光学



当我们降临到这个世界上的那一刻，就与光结下了不解之缘。光，让我们能够感知到五光十色，绚烂多彩；光，让我们感到温暖。人的眼睛，作为一架天生的精密光学“仪器”，内含着丰富的光学知识。但是，人们对于光的认识和研究却经历了一个漫长的历史过程。

在古代，对于光的认识与对视觉的认识是混合在一起的，这种情况差不多直到16世纪才有所改观。望远镜和显微镜相继发明之后，人们对自然现象才能有更加精细的了解，并且催生了近代光学的产生。

对光的研究形成了一门学科，也就是光学。这可以追溯到两千多年前，与各种光学器具的发明和改进有着密切的联系。古人发明了各种反射镜，其中镜子是人们最常用的。我国古人用“阳燧”取火，可以看作是对光最有价值的利用。当时中国的墨家学派对各种反射镜进行了全面的研究，古希腊人对光的折射现象的研究已很有系统。进入近代之后，当以牛顿的研究最有代表性，而他与其他科学家关于光的本性的争论，对光学的发展产生了深远的影响。

折射定律的建立

我们看水中鱼的位置，比实际上鱼所在的位置要高一些；将一根筷子的一部分放在水里，看起来这根筷子就像在水面处被折弯了一样。这些都是光的折射现象，而对这一现象的研究正是光学的起源。事实上，折射定律的确立也不是一帆风顺的，几经沧桑，经过了漫长的岁月。

早在古希腊时代，科学家托勒密（就是提出地心说的那个托勒密）著有《光学》（5卷），其中第1卷讲述眼与光的关系，第2卷说明可见条件、双眼效应，第3卷讲平面镜与曲面镜的反射及太阳中午与早晚的视径大小问题，第5卷试图找出折射定律，并描述了他的实验，讨论了大气折射现象。他曾专门做过光的折射实验，并且得到了“折射角与入射角成正比”的结论，后来阿拉伯人也进行过类似的测量。大约过了1 000年，有人发现这一结论与事实不符。到了17世纪初期，开普勒也

在光的折射问题上进行了实验研究，可惜的是他也没有找到正确的折射定律的表达式。

折射定律的正确表述最早是由荷兰的数学家斯涅耳(1580—1626，荷兰莱顿人，数学家和物理学家，曾在莱顿大学担任过数学教授)于1621年通过实验得到的。他认为，“在不同的介质里入射角和折射角的余割之比总保持相等的值”，但遗憾的是，斯涅耳在世时并没有发表这一结果。直到1626年，笛卡儿阅读了斯涅耳的遗稿后才将这一结果发表。此后不久，笛卡儿也推导出了同一结果。他在其名著《方法论》的附录中，借助小球的运动，用类比的方法阐述了光的折射问题。1637年，笛卡儿在《屈光学》一书中首次公布了具有现代形式(正弦之比)的规律。所以，人们又把光的折射定律称为“斯涅耳定律”，或“斯涅耳-笛卡儿定律”。

笛卡儿得到了折射定律的正弦表达式，但还不完全等同于今天的表达方式。此外，笛卡儿的推导是基于媒质交界面两侧光速的平行分量相等的假设。为了使理论结果与实验数据相符，他还必须假设密媒质中的光速比疏媒质中的大。现在看来，这里的两个假设显然都是错误的。

笛卡儿的推导受到了法国科学家费马(1601—1665)的批评。1661年，费马将数学方法用于分析折射问题，推导出折射定律，得到了正确的结论。这就是著名的最短时间原理，即：光线传播的路径是需时最少的路径。

镜子史话

唐太宗是中国历史上一位著名的皇帝。他有一个著名的臣子，叫魏徵。魏徵曾向唐太宗进谏：“以铜为鉴，可以正衣冠。以人为鉴，可以知得失。以史为鉴，可以知兴替”。

鉴，就是镜子。

远古时代，先民们以水面为镜，在平静的水面上观看自己的倒影，梳妆打扮。水镜面积虽大，但多模糊不清，经不起半点风浪的干扰(图2-49)。



图2-49　水面的镜面反射现象

后来，先民们在打制石器工具时，发现了一种石头，经过打制、修理、磨光后可以照出影像，于是出现了石镜。陶器出现后，先民们又用陶器盛满水作为镜子，出现了可以移动的水镜，古人称其为“瓦鉴”。再后来，则改用铜器盛水为镜。当铜器打磨得非常光滑时，就是没有水

也能够作为镜子用，于是出现了铜镜(图 2-50)。

古人往往认为，铜镜的制造和使用应该开始于黄帝时代，虽然这不过是一种传说，但也充分反映了我国铜镜使用历史之久远。目前考古发掘表明，我国现存最早的铜镜应该是出土于甘肃广河齐家坪墓和青海贵南县尕马台 25 号墓的两面铜镜。它们应是新石器时代的物品，距今约 4 000 年。



图 2-50 古人用的青铜镜

后来，我国制作铜镜的技术，通过丝绸之路传到了西方一些国家。如公元 4 世纪，古罗马人已经能够制造出各种各样的金属镜，其中照影效果最好的是银制的镜子。中世纪，能够随身携带的手镜已相当普及，不但有各式各样的小圆形金属铸镜，还出现雕刻技术相当精美、装嵌在金属或象牙盒中便于贵妇人出门携带的小盒镜，当时在上流社会妇女中很流行。

世界上第一块玻璃镜出现于意大利，聪明的威尼斯人在玻璃上贴上一层锡箔，然后倒上水银，使锡溶解成“锡汞剂”，这种“锡汞剂”牢牢地粘在玻璃上，制成了镜子。这种工艺给制镜业带来一次大的革命。

用水银(汞)镀制成玻璃镜则是开始于 1840 年，是由英国人发明的，这使玻璃镜的制造成本大为降低，也使得玻璃镜逐渐成为人们的日常生活用品。1850 年后，随着溴化银镀料的研制成功和广泛使用以及造镜工艺的简化，玻璃镜生产迅速扩大。后来，玻璃镜也在中国的市场上出现了。清同治年间，慈禧太后对玻璃镜大感兴趣，让人设计了一个半月形的镜面，梳妆打扮时，身体无须转动，发式、容颜、衣着穿戴一目了然，这面镜子当时为中国一绝。

显微镜漫话

一滴水里有些什么？你把眼睛睁得再大，也不会有太多的发现。那就借助显微镜吧！通过显微镜可以发现，一滴水里竟然隐藏了这么多的“怪物”啊！显微镜真神奇，是它让这些“怪物”们原形毕露的。那么，你知道显微镜是怎样诞生的吗？这还要归功于一对顽童和一个老人呢！

四百多年前，荷兰有一个磨眼镜片的技师名叫詹森，他有两个孩子，天真淘气。1590 年某一天，兄弟俩趁父亲外出，偷偷溜进了父亲的工作间。房间里有很多磨好的玻璃片，他们可以随意地玩。忽然，哥哥发现了一根铜管，就伸手拿了过来，并把两片玻璃放在管子两端，对准一本书看去。他看到一些新奇的事情，一个逗号竟然像一个胖蝌蚪似的趴在那里。弟弟听了哥哥的发现，就把这个神奇的管子夺了过来，对准哥哥的眉毛看去，哥哥的眉毛看上去竟然像一根根钉子一样！

父亲知道了孩子们的发现之后，十分高兴，并动手改进了这个装置。他把管子做成细长细长的，两端各固定一块凸透镜，管子的长短还可以调整。就这样，第一架显微镜诞生了。但是，詹森虽然是发明显微镜的第一人，却并没有发现显微镜的真正价值。也许正因为如此，詹森的发明并没有引起世人的重视。

九十多年后，显微镜被荷兰人列文虎克发展了，并且开始用于科学研究。列文虎克(1632—1723，图 2-51)改进显微镜的过程，也是充满偶然性的。


图 2-51　列文虎克像

列文虎克是荷兰显微镜学家和微生物学的开拓者，1632 年 10 月 24 日出生在荷兰代尔夫特市的一个酿酒工人家庭。他父亲去世很早，他由母亲独自抚养，只读了几年书，16 岁即外出谋生，过着漂泊苦难的生活。后来返回家乡，在代尔夫特市政厅当守门人。不过，列文虎克却是一个对新奇事物充满强烈兴趣的人。

由于看大门的工作比较轻松，时间宽裕，而且接触的人也很多，在一个偶然的机会里，他从一位朋友那里得知，荷兰的最大城市阿姆斯特丹有许多眼镜店，除磨制镜片外，也磨制放大镜，并告诉他说："用放大镜，可以把看不清的小东西放大，并让你看得清清楚楚，奇妙极了！"

具有强烈好奇心的列文虎克，默默地想着这个新鲜有趣的问题，越想越有趣。"闲着也没事，我不妨也买一个放大镜来试试。"可是，他到眼镜店一问，放大镜的价钱却高得吓人。他只好高兴而去，扫兴而归了。

列文虎克从眼镜店出来，恰好看到磨制镜片的人在使劲地磨着。原来，磨制的方法并不神秘，只是需要仔细和耐心罢了。

"索性我也来磨磨看。"

从那时起，列文虎克利用自己的充裕时间，耐心地磨制起镜片来……

功夫不负有心人。1665 年，列文虎克终于制成了一块直径只有 0.3 cm 的小透镜。他把这块小透镜镶在一个架上，又在透镜下边装了一块铜板，上面钻了一个小孔，使光线从这里射入，从而反射出所观察的东西。这样，列文虎克的第一台显微镜成功了。由于他练就了磨制高倍镜片的精湛技术，他制成的显微镜的放大倍数超过了当时世界上已有的其他任何一架显微镜(图 2-52)。


图 2-52　古老的显微镜

列文虎克并没有就此止步，他继续下功夫改进显微镜，进一步提高其性能，以便更好地去观察了解神秘的微观世界。为此，他专心致志地研制显微镜，几年后终于磨制出能把物体放大300倍的显微镜。

列文虎克用玻璃棒在水池里蘸了一滴污水，拿到显微镜下面看。这次，他竟然发现了一个奇妙的世界：污水滴里竟有成群的“小野兽”在“奔跑”，它们有的是毛茸茸的，有的像圆球，还有的则具有变形的本领……这些小家伙们一刻也不停，不是到处游荡，就是相互打架。

列文虎克的工作是保密的，他从不允许任何人参观，总是单独一个人在小屋里耐心地磨制镜片，或观察他所感兴趣的东西。作为自学者，他从动物学各科中获得了广博的知识。他把从干草浸泡液中观察到的微生物称为“微动物”。

但是，列文虎克却对他的朋友、医生兼解剖学家德·格拉夫(1641—1673)毫不保密。格拉夫既是代尔夫特城里的名医，同时也是英国皇家学会的通讯会员。他早听人说，列文虎克正在研制什么神秘的眼镜。一天，格拉夫专程前来拜访列文虎克。列文虎克热情地接待了客人，并拿出自己的显微镜请格拉夫观看。不看则已，看着看着，格拉夫抬起头来，严肃地说道：“亲爱的，这可真是件了不起的创造发明啊！”格拉夫接着又说：“你知道吗？你的创造发明具有极其伟大的意义。你不能再保守秘密了，应该立即把你的显微镜和观察记录，送给英国皇家学会。”“难道连显微镜也要送去?!”这可是列文虎克从来没有考虑过的严肃问题——要公开自己的显微镜。他认为这是自己的心血，自己的财富。所以，当他听了格拉夫的劝告后，他竟情不自禁地把显微镜收了起来。“朋友，这种公开不是坏事，谁也不会侵占你的成果，你必须向世界公众表明：你的观察是如此非凡，这是人类从未发现的新课题。”

1673年的一天，英国皇家学会收到了一封厚厚的来信。打开一看，原来是一份用荷兰文书写的、字迹工整的记录，其标题是《列文虎克用自制的显微镜观察皮肤、肉类以及蜜蜂和其他虫类的若干记录》。在这篇文章中，列文虎克向皇家学会的学者们展示了一个崭新而神奇的世界，吸引了很多人的目光。

为了验证列文虎克文章中所描述的世界是不是真实存在的，皇家学会不得不委托它的两个秘书——物理学家罗伯特·胡克(1635—1703)和植物学家格鲁(1641—1721)，为皇家学会弄一个质量最好的显微镜来做一次亲自观察。

经过几番周折，列文虎克的科学实验终于得到了英国皇家学会的认可。于是，列文虎克的这份记录被译成了英文，并在英国皇家学会的刊物上发表了。这份出自“乡下佬”之手的研究报告果真轰动了英国学术界。列文虎克也很快成了英国皇家学会的会员，英国皇家学会对他的成就做出了极高的评价。

从此，人们认识到了一个新的世界——微生物世界。显微镜的价值开始真正地被人们重视起来。

列文虎克一生中磨制了超过500个镜片，并制造了400种以上的显微镜，其中只有9种至今仍有人使用。在列文虎克在世的时候，人们已经承认了他的功绩。但是，一百多年以后，当人们在用效率更高的显微镜重新观察列文虎克描述的形形色色的“微动物”，并知道它们会引起人类严重疾病和产生许多有用物质时，才更加认识到列文虎克对人类认识世界所做出的贡献是多么伟大！

望远镜的发明与发展

听说荷兰人发明了望远镜（图2-53），伽利略立刻对此产生了兴趣。他想，既然小的物体可以被放大，那么远的物体能不能被移近呢？于是他便动手开始了实验探索。



图2-53 古老的单筒望远镜

开始，伽利略只是按照传闻中的样子仿制，即在一根管子两头各放一个凸透镜，但怎么做也不能成功。后来，他改用一个凸透镜和一个凹透镜，但两个镜子之间的距离总是调不好。当时，用手工磨制镜片是一件很费劲的事情，每磨一片要花很长时间。伽利略不断地磨呀、改呀、装呀、拆呀，在别人看来，伽利略简直是疯子。不过，这个伽利略梦寐以求的装置终于在1609年被制成了。这是一个细细的管子，把眼睛贴近凹透镜向远处看时，远处的东西似乎移近了许多，它们比直接用眼睛看大得多。按照伽利略的计算，这个装置大约能放大8倍。这个小小的管子引起了人们极浓厚的兴趣，称之为“伽利略魔管”（图2-54）。其实，它就是人类历史上第一架望远镜。利用这个望远镜，伽利略看到了月球那长得坑坑洼洼的麻子脸，看到了木星的四个卫星，等等。

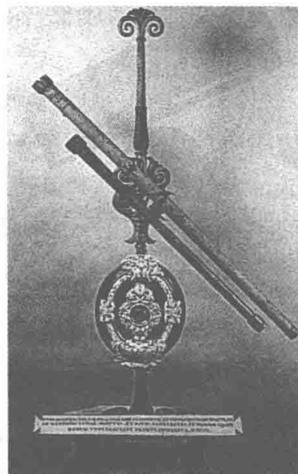


图2-54 伽利略发明的望远镜

第一台望远镜被制成两年以后，开普勒在1611年设计出了另一种望远镜。它的管子更长一些，两端用的全是凸透镜。用它观察物体，物体显得更大，视野也扩大了许多。但它也有一个缺陷，就是通过它看到的都是物体倒立的像。后来，人们为了弥补这一缺陷，在管子中放置了一对棱镜。光线进入物镜以后，通过棱镜改变了几次方向，等到再通过目镜进入人的眼睛时，倒立的像也就被正了过来。

1672年，牛顿设计了一种新的望远镜（图2-55）。与伽利略的折射望远镜不同，牛顿的新式望远镜使用一面凹面镜将光线聚集到焦点上，因此被称为反射望远镜。反射望远镜的反射镜就像一个水桶一样，水桶越大，装的水越多；反射镜越大，能够收集到的光也越多。这种设计使此后望远镜的放大倍率达到了数百万倍，远远超过了折射望远镜所能达到的极限。


图2-55　牛顿制造的反射望远镜

牛顿的光学研究

牛顿在力学上有着伟大的成就，在光学研究方面牛顿的工作多是奠基性的，其中尤以对色散的研究最为著名。

“色散”是一个古老的话题，最引人注目的“色散”现象是彩虹（图2-56）。

早在13世纪，科学家就对彩虹的成因进行了探讨。德国一位叫西奥多里克的传教士，曾通过实验模拟出了天上的彩虹。他用阳光照射装满水的大玻璃球壳，观察到了和空中一样的彩虹，以此说明了彩虹是由于空气中水珠反射和折射阳光造成的现象。不过，他并没有能够解释清楚这种现象形成的根本原因。


图2-56　彩虹——自然界的光折射现象

笛卡儿对彩虹现象也有兴趣，他用实验检验了西奥多里克的论述：用三棱镜将阳光折射后投在屏上，发现彩色的产生并不是由于进入媒质深浅不同造成的。因为不论光照在棱镜的哪一部位，折射后屏上的图像都是一样的。遗憾的是，笛卡儿的屏离棱镜太近（只有几厘米），他没有看到阳光色散后的整个光谱，只注意到光带的两侧分别呈现蓝色和红色。

1648年，布拉格的马尔西用三棱镜演示色散成功，不过他却解释错了。他认为，红色是浓缩了的光，蓝色是稀释了的光；之所以阳光“色散”后会出现五颜六色，是光受到不同物质的作用，因而呈现出各种不同的颜色。

17世纪，望远镜和显微镜纷纷问世，伽利略运用望远镜观察天体，列文虎克用显微镜观察微小物体。然而，当放大倍数增大时，这些仪器不可避免地出现了像差和色差，这些现象使人们深感迷惑，为什么在图像的边缘总会出现颜色？这和彩虹有没有共同之处？这类现象有什么规律性？怎样才能改善图像质量？

17 世纪 60 年代，牛顿正在英国剑桥大学学习。他的老师巴罗教授对光学很有研究。通过巴罗教授，牛顿喜欢上了光学实验，还亲自动手磨制透镜，想按自己的设计装配出没有色差的显微镜和望远镜。正是这个愿望，激励牛顿对光和颜色的本性进行深入的研究。

牛顿从笛卡儿的棱镜实验得到启发，又借鉴了胡克和玻意耳的分光实验。胡克用了一只充满水的烧瓶代替棱镜，像屏距折射位置大约 60 cm，玻意耳把棱镜散射的光投到一米多高的天花板上，而牛顿则将距离扩展到六七米，从室外经洞口进入的阳光，再经过三棱镜后直接投射到对面的墙上。这样，他获得了展开的光谱。

为了证明色散现象不是由于棱镜与阳光的相互作用，也不是由于其他原因造成的，而是由于不同颜色具有不同的折射性导致的，牛顿又进行了一个实验。

他拿 3 个棱镜进行实验，3 个棱镜完全相同，只是放置方式不一样（图 2-57）。倘若颜色的分散是由于棱镜的不平或其他偶然的不规则性导致，那么第 2 个棱镜和第 3 个棱镜就会增强这一分散性。可实验结果却是，原来分散的各种颜色，经过第 2 个棱镜后又还原成白光，形状和原来一样。再经过第 3 个棱镜，又分解成各种颜色。由此证明，棱镜的作用是可使白光分解为不同成分的颜色，又可使不同颜色的成分合成为白光。

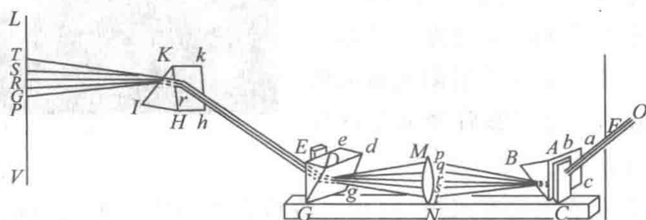


图 2-57　牛顿用 3 个棱镜做实验

牛顿的结论和当时已流传上千年的观念是格格不入的。他预料会遭到一些科学家的反对，于是又进行了一个很有说服力的实验。牛顿把这个实验称为"判决性实验"（图 2-58）。

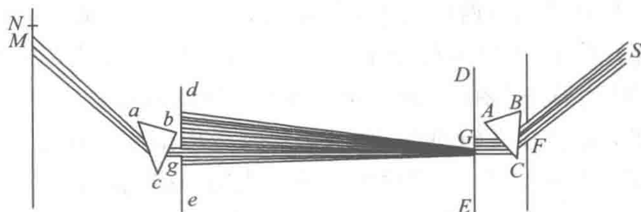


图 2-58　牛顿的"判决性实验"

牛顿的光学研究成果集中反映在1704年出版的《光学》一书中。该书的副标题是“关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文”。棱镜光谱实验收集在该书中。正像牛顿在该书开始所说的：“我的计划不是用假设来解释光的性质，而是用推理和实验来提出并证明这些性质。”牛顿有一句名言：“我不杜撰假说”。他的光学研究正是从实验和观察出发，进行归纳综合，总结出一套完整的科学理论。归纳法是科学研究的重要方法之一（当然，不是唯一的方法！），牛顿对色散的研究为后人树立了榜样。

光本性的初步探讨

在光学发展的历史中，对光的本性有过长期的和激烈的争论。这些争论对光学的发展特别是对人类认识光的本性产生过积极的作用，推动了光学的发展。

1. 光的微粒说

所谓光的微粒说，就是认为光是一种微小的粒子。最早提出这种看法的是古希腊时期的毕达哥拉斯和德谟克立特等人，他们认为，光就是物体发出的一种微小粒子，能够进入人的眼睛，引起视觉的效果。

到了17世纪，笛卡儿提出了光的机械微粒的观点，他说：“光仅仅是充塞其他物体孔隙的极其细微的物质”。这些“细微的物质”是一种弹性的粒子，可以很好地解释光的反射现象和光的折射现象。

牛顿对于光本性的认识上还是以微粒说为主的，他指出：“可以设想光是一群难以想象的细微而运动迅速的大小不同的粒子，这些粒子从远处的发光体那里一个接着一个地发射出来……”。当然，开始他在解释一些光学现象的时候，还是将微粒说和波动说结合在一起的，但到了1675年，他开始完全排斥纯粹的波动说，因为这种理论无法解释光沿直线传播的问题。1704年，牛顿在《光学》一书中对光的本性理论进行了总结，从这些总结中可以看出，他在光本性问题上主要坚持的还是微粒说，他将很多波动说不好解释的问题列举出来，并进行了深层次的剖析。

不过，很有意思的是，牛顿在分析薄膜色彩和牛顿环的时候，却使用了近似于今天的波动说的理论，只不过他始终没有承认自己所使用的是波动理论的内容！由此也是可以看出，牛顿虽然肯定光的微粒说，但他对光的一些波动性特点也是有研究的。

2. 光的波动说与电磁波说

光的本性是波，早期主张波动说的主要是格里马第、惠更斯和胡克。

格里马第在发现了光的衍射现象之后，为了解释这种光线非沿直线传播的现象，设想光是一种做波浪状运动的精细流体，所以它才有着与水波一样的能够绕过障碍物的特性。

胡克的波动理论与他研究的颜色问题有关系，他认为光是一种类似于水波的快速脉冲。在1665年的《显微术》中，胡克提出"光必定是一种振动"，并且是一种快速的小振幅的振动。而且，在解释光波扩散的时候，胡克还提出了类似于波前和波面的概念。

在这个时期，惠更斯对于发展光的波动说所起的作用应该是最大的，他在胡克之后在这个领域做了有益的扩展。1678年，他在《论光》中明确指出光是发光体中微小粒子的振动，并且认为如果怀疑"光是某种物质的运动"是无法想象的。在发展光的波动说方面，惠更斯还提出了著名的"惠更斯原理"，即"传播波的物质的每一个微粒，应当不仅向沿亮点出发的直线上的下一个微粒传递其运动，而且必定向所有与它相邻和背向运动的微粒传递。因此可以得出，围绕每一个微粒，都有一个以该微粒为中心的波产生。"

但是，惠更斯在光的波动说方面的认识并不完美，他认为光是纵波，而且是脉冲波（而光事实上是横波）。另外，最大的麻烦就是缺少充分的数学基础和坚实的事实支撑。所以，在很长的一段时间内，依然是光的微粒说占主导，而光的波动说则处于无足轻重的地位。

光的波动说真正得到充分的认可，还是到了托马斯·杨和菲涅耳等人在该领域取得了足够的成绩之后。

1801年，英国物理学家托马斯·杨（1773－1829，图2-59）为了解释牛顿环现象，提出了光的"干涉原理"，指出所谓的牛顿环其实就是光的干涉图样。为了进一步验证自己的理论，托马斯·杨还进行了一个非常重要的实验。



图2-59　托马斯·杨

托马斯·杨用一个屏幕将暗室的窗户遮住，然后在屏幕上开两个小孔，当这两个小孔比较大的时候，透过它们的阳光只是在另外一边的屏幕上形成两个光斑。随着将两个小孔的尺寸逐渐变小，托马斯·杨终于在另外一边的屏幕上来自于两个小孔的光束照射的区域看到了一系列的由暗条隔开的彩色条纹（图2-60），就像彩虹一般，与牛顿环现象十分

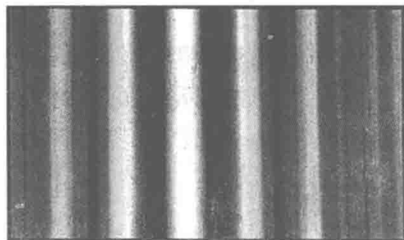


图2-60　杨氏双缝干涉图样

相似。其实，托马斯·杨看到的是光的干涉现象，这个实验也就是著名的杨氏双缝干涉实验的最初形式。

托马斯·杨的实验证明了光的确是波，只有用波动说才可以解释。但在很长的一段时间内人们并不接受他的观点，使得他的工作没有能够得到及时承认。到了1815年，法国著名物理学家菲涅耳开始对光的衍射现象进行研究，并且独立地得到了干涉和衍射方面的规律，建立了更加完善的理论，而且有着充分的实验和数学的验证。菲涅耳的工作为光的波动说的复兴提供了有力的证据，也对托马斯·杨的工作给予了极大的肯定。

菲涅耳为了证明自己的观点，于1818年进行了著名的双镜实验。他将两块平面镜以夹角接近180°并排，然后将一个通过窄缝的光线投射到它们上面，光线在向同一个接收屏幕反射的过程中叠加在了一起，从而显示出一系列的干涉条纹。但是，当把两块镜面涂黑或者让它们变成一个平面时，条纹马上消失了，这也就说明之前的两束光确实发生了干涉，证明了光的波动性。

托马斯·杨和菲涅耳的工作使光的波动说被牢牢地确立了起来，到了19世纪中叶，光的波动说的地位已经不可动摇了。后来，人们又通过实验进一步测得光在水中的速度比空气中小，这正是波动说的必然结果。

光的电磁说其实也可以归类到光的波动说之中，只不过这种认识更加明确了光到底是什么样的波！19世纪60年代，麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，并且在进一步研究的过程中发现电磁波的速度与光的速度是一样的，因此认为光也是一种电磁波。在论文中，他写道:“这个速度与光速值是如此相近，以至于有充分理由认为，光本身就是一种以波的形式按照电磁学规律在电磁场内传播的电磁扰动”。后来，德国物理学家赫兹通过实验证实了电磁波的存在，而且还发现了电磁波与光一样，能够发生反射、折射、干涉、衍射和偏振等现象。

光速的测定

光的速度超过了世界上一切运动物体的速度，那么这个速度到底有多大呢？为了得到光速值，历史上有不少的人动过脑筋。

四百多年以前，伽利略曾经进行过一个实验，遗憾的是他的实验失败了。他选择了相距4.8 km的两座小山，他与助手分别站在这两座小山的山顶上，两人手里都拿着一盏带有灯罩的手灯。伽利略还带有一个计时器。测量开始时，伽利略先拿去手灯上的罩子，同时开始计时。一束光线从伽利略的手灯发出，传向远方。当伽利略的助手看到了对方山头上传来的灯光，立即揭去手灯上的罩子，一束从助手手灯上发出的光射向伽利略所在的山头。当伽利略看到从助手处手灯传来

的光线后，立即停止计时器。这个实验设计本身没什么问题，但光传播得太快了，而且实验中还存在着两次反应时间，一次是从助手看到伽利略的手灯发出的光到拿掉自己手灯上的罩子，另一次是从伽利略看到助手的手灯发出的光到停止计时器，因此不可能测出光速。不仅伽利略没有成功，19 世纪以前没有一个人在地面上成功地测量出光速。

虽然如此，伽利略的实验却告诉我们光的速度太大了，只有用特殊的方法才能测量它！

1676 年，丹麦天文学家奥利·罗默第一次提出了有效的光速测量方法——利用木星的卫星蚀（就像地球上看到的月食）。1675 年，罗默测量了木星各卫星的运行周期。几个月后，当他再次测量时，发现两次测量的结果并不同，当地球处在距离木星最近的位置时，测得的木卫一的周期是 42.5 h，但当地球处在自己的轨道上距离木星最远的位置时，木卫蚀发生的时间越来越晚，木卫蚀发生的时间已向后推迟了 1 000 s！罗默给出的解释是，木卫蚀所推迟的时间正好等于来自木星卫星上的光穿过地球轨道直径这段额外距离所用的时间。但在那个时候，大家知道的地球轨道的直径大约是 276 000 000 km，而不是事实上的 300 000 000 km，后来，荷兰物理学家惠更斯根据罗默测出的数据和地球的半径，第一次计算出了光的传播速度约为 200 000 km/s；1728 年，英国天文学家布拉德雷测得的光速值为 310 000 km/s。作为对光速的第一次成功测量，罗默的方法被载入了史册。

1849 年，法国物理学家阿曼德·斐索想出了一个巧妙的测量光速的方法，即著名的“齿轮法”。他利用一个飞速旋转的齿轮，使光线从齿轮的某一齿隙中穿过去，射到一面小镜子上，再由镜面反射回来。假如在此期间齿轮只转了半个齿距，返回来的光线就会被齿牙挡住，我们就看不到光线。假如齿轮转得稍微快一点，在光线一来一去的期间，齿轮正好转过一个齿距，则返回的光线恰好从齿隙中钻回来，我们就可以观察到它。齿轮的转速是可知的，光线来回的距离和时间就都可以得到了，光速自然也就可以计算了。斐索通过这个实验测得的光速是 315 000 km/s。虽然这个数值还不够精确，但斐索的这种实验方法却影响了以后的所有光速测量实验，很多的成功实验就是在改进该实验的基础上实现的。

1850 年，法国物理学家傅科用“旋转镜法”测出光速是 298 000 km/s；1874 年，考尔纽改进了斐索的旋转齿轮法，测得光速为 299 990 km/s。

接下来出场的是以光速测定为终身目标的美国物理学家迈克尔孙。迈克尔孙曾设计旋转镜和干涉仪，用以测定微小的长度、折射率和光波波长。1879 年，他测得的光速为(299 910±5)km/s。1882 年，他测得的光速为(299 853±6)km/s。

这个结果被公认为国际标准并沿用了 40 年之久。迈克尔孙最后一次测量光速(图 2-61)在加利福尼亚两座相距 35 km 的山上进行的，光速测量的精确值为(299 798±4)km/s。在这次测量中，迈克尔孙得了中风，于 1931 年去世。

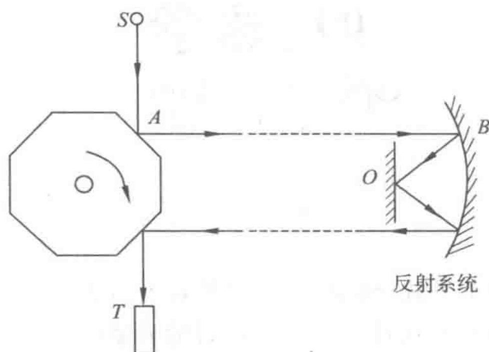


图 2-61　迈克尔孙用转动八面镜法测光速

在激光得以广泛应用以后，开始利用激光测量光速，方法是测出激光的频率和波长，并计算出光速 c。目前这种方法测出的光速是最精确的。根据 1975 年第 15 届国际计量大会决议，把真空中光速的值定为 299 792 458 m/s，通常多采用 300 000 000 m/s。

四、热学

温度计的诞生

两千多年前，有个叫菲隆（约前300—?）的古希腊人，喜欢搞些小玩意儿。有一次，他制作了一个别致的玩具。在一个U形的玻璃管里装上一半水，再将弯管的一端用铅球密封，另一端则用玻璃球密封，这样在玻璃管的两端就各封闭了一段空气。这时，如果加热铅球，U形管中的水就会向玻璃球那一侧跑；等铅球冷却之后，水又回到原来的位置。也就是说，玻璃管里的水会因加热或冷却而来回移动。

其实，这个玩具就蕴含着温度计的雏形。一千七百多年之后，伽利略受这个“玩具”的启发，开始深入研究气体热胀冷缩的特性，并最终发明了气体温度计。

这种气体温度计的构造并不复杂，伽利略用一根细长的玻璃管，在一端做成空心圆球（玻璃泡），另一端开口，事先在管内装上一些带有颜色的水，再将开口的一端倒插入盛有水的容器中（图2-62）。外界温度升高时，玻璃泡里面的气体膨胀，就能使玻璃管中的水位降低；反过来，温度降低时，玻璃泡内部的气体收缩，玻璃管中水位就上升。若在玻璃管上标上等分的刻度，就可以显示温度值了。这就是世界上最早的气体温度计。

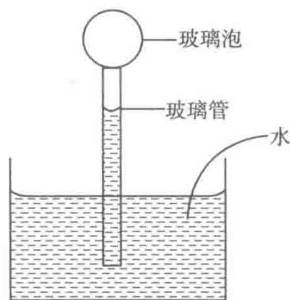


图2-62　伽利略温度计的示意图

伽利略发明的温度计不仅解决测量温度的问题，还直接导致了体温表的发明。

伽利略有位名叫桑克托留斯（1561—1636）的朋友，是个医生。他一直在留心寻找一种可测量病人体温的仪器。有一天，他去拜访伽利略，看到伽利略正在研究的气体温度计，桑克托留斯大喜过望，回家之后就按照自己的设想和诊病需要，对气体温度计进行了改进。就这样，1600年世界上第一支体温表就诞生了。

由于伽利略发明的温度计过于简单，存在着诸多缺陷，测得的温度不够准确。

就在这个时候，伽利略的学生斐迪南大公(1610—1670)在老师的指导下开始研究液体热胀冷缩的性质，并设想利用液体的这一性质来指示温度的变化。

斐迪南试验了多种液体，最后发现酒精受热以后体积的变化比较显著。1654年，斐迪南终于成功发明了世界上第一支酒精温度计。它是在玻璃泡里注入适量染色的酒精，再把玻璃泡微微加热，利用酒精蒸气赶跑玻璃管中的空气，然后迅速把玻璃管口封死，以消除大气压强对测温的影响。酒精温度计构造简单，制作方便，准确度高，一问世就得到了广泛应用。

后来，在使用过程中，人们遇到了一个新的问题：用酒精温度计去测开水的温度时，温度计里一片模糊，无法读数。这是什么原因呢？原来，开水的温度能达到100℃，而酒精在温度达到78℃时就变成气体了。显然，要测量较高的温度，必须寻找一种新的液态物质来代替酒精。人们找到的新的液态物质就是水银。水银在357℃时才会变成气体，而且它的体积随温度的变化也比较显著。1695年，水银温度计诞生了。这种温度计既可以测量高达350℃的高温，也可以测量−39℃的低温。

1724年，荷兰物理学家华伦海特(1686—1736，图2-63)经过近10年的研究和改进，建立了以他的名字命名的温标——华氏温标。

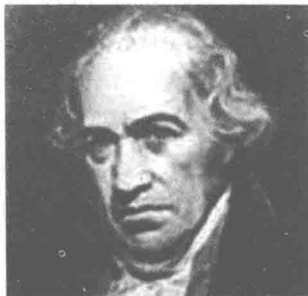


图2-63　华伦海特

华伦海特于1686年5月24日出生在但泽(现波兰格但斯克)。1701年，华伦海特的父母突然去世，他的保护人送他到阿姆斯特丹接受商业教育。华伦海特在那里学习科学仪器的制作，对物理学很有兴趣。1707年，他先后前往柏林、莱比锡、德累斯顿、哈勒等地，通过参观别的学者以及工匠的操作，学到了不少技术。1708年，在哥本哈根遇到了丹麦天文学家罗默(1644—1710)。1715年，华伦海特和数学家莱布尼茨合作制成测定大海经度的时钟。1724年，华伦海特正式确立以他名字命名的温标。同年，他被选为英国皇家学会会员。1736年，他发明了一种抽水泵，获得了专利，用这种泵抽干了荷兰一些低洼地里的水。1736年9月16日，华伦海特在荷兰海牙逝世，终年50岁。

华伦海特所拟定的刻度，是把水、冰和氯化氨混合物的温度作为最低温度点，取作华氏零度，记为0℉；把冰熔解的温度作为第2个温度点，记为32℉；将温度计放入口中，测得的人体温度作为第3个温度点，记为98.6℉，用这种温标表示水的沸点为212华氏度，记为212℉。

华氏温度计最重要的优点是：在相同的条件下，它指示的温度总是一样的。

这种温度计一般在上方用一个“F”(取了华伦海特名字的第一个字母)作为标记。华氏温度计主要在英美国家使用。

摄尔修斯与摄氏度

安德斯·摄尔修斯(1701—1744,图2-64)是瑞典物理学家和天文学家,瑞典科学院院士,1701年11月27日生于乌普萨拉。他曾在乌普萨拉大学学习,受父亲影响,从事天文学、数学、地球物理和实验物理学研究。1727年,年仅26岁的摄尔修斯便担任了乌普萨拉科学协会会长,并在大学任教。1730—1744年任乌普萨拉大学教授,1740年兼任乌普萨拉天文台台长。


图2-64 摄尔修斯

1732年至1736年,摄尔修斯离开瑞典到国外访问,先后到柏林、纽伦堡和巴黎等地,广泛地参观了这些地方的天文台并访问了当地诸多著名科学家。

1733年,他把在北极观察的北极光的情况收集成册,在纽伦堡出版了名为《北极光观测资料汇编》一书。他在巴黎访问期间,正赶上一场关于地球形状的大论战。巴黎一方认为地球是一个纵长的柠檬形,而伦敦一方则认为地球是两极扁平的横长橘子形。为了确定地球的形状,并验证牛顿关于地球赤道附近半径大而两极扁平的理论是否正确,法国科学院于1735年和1736年先后派出两支科学考察队伍,到赤道和北极圈内进行大规模的地球纬度测量工作。

摄尔修斯1735年去伦敦搞到了测量所需要的仪器,1736年便随队出发到北极圈进行实测,1737年顺利完成任务回国。这次论战和实地测量的结果,证实了牛顿力学理论的正确性,使牛顿力学在法国得到了广泛的传播。

摄尔修斯在总结前人经验特别是华伦海特发明的华氏温标基础上,于1742年创立了摄氏温标。他以水银为测温物质,以物质的热膨胀为测温属性,制成了水银温度计,然后将温度计插入正在熔化的雪中,将此时的温度“冰点”作为一个标准温度点;接着又把温度计插入沸腾的水中,将此时的温度“沸点”作为另一个标准温度点(这实际上暗含了“标准大气压”这个条件)。然后将冰点和沸点之间的温度值等分为100份,规定每一份为1度,所以摄氏温标又叫百分温标。为了避免测量低温时出现负值,他把水的沸点定为0度,而冰点定为100度。在摄尔修斯死后不久的1750年,摄尔修斯的同事施勒默尔把原来摄尔修斯的标度方式倒转了过来,以冰点为0度,沸点为100度,从而使相应的温度计更便于观测,这种摄氏温标的标度方式一直延续至今。

这种温度计开始被称为“瑞典温度计”，到了 1800 年左右，人们开始改称它为摄氏温度计。1948 年，在巴黎召开的第九届国际计量大会上，根据“名从主人”的惯例，将百分温标正式命名为“摄氏温标”，以纪念摄尔修斯的贡献。摄氏温标的单位取为“摄氏度”，用“℃”表示。摄氏温度现在仍然是世界通用的温度数值表示方法。摄尔修斯对温度计的制作和改进，促进了热学的研究和发展。

除了在温标研究上的贡献外，摄尔修斯还研究过沸点和气压的关系，得到了气压不变液体的沸点也不变化的结论。他还发现了不同液体混合后体积减小的现象。例如，他把 40 单位体积的水和 10 单位体积的硫酸混合，结果混合液只有 48 单位体积。其实，这个研究已经触及物体分子之间存在孔隙的问题。

1744 年 4 月 25 日，摄尔修斯在乌普萨拉逝世。

开尔文与热力学温标

威廉·汤姆孙(1824—1907，后来被封为开尔文勋爵，所以后世常称其为开尔文或开尔文勋爵，图 2-65)，1824 年6 月 26 日生于北爱尔兰贝尔法斯特。他的特殊天赋和理解力很早就表现了出来，10 岁时就被格拉斯哥大学注册录取。在大约 14 岁的时候，开尔文正式开始学习大学程度的课程。15 岁时他凭借一篇题为《地球形状》的文章获得了大学颁发的金质奖章。这篇文章中论及的一些重要概念在后来还经常用到，由此可见其价值。16 岁时开尔文转学来到剑桥，在剑桥他所有功课都很优秀，以全级第二名的成绩顺利毕业。他毕业后到了巴黎，在勒尼奥的指导下进行了一年实验研究。



图 2-65　开尔文像

1846 年，年仅 22 岁的开尔文再次回到了格拉斯哥大学，不过这一次他是来担任自然哲学(即现在的物理学)教授的，在这个岗位上他一直工作到 1899 年退休为止，达 53 年之久。由于装设第一条大西洋海底电缆有功，英政府于 1866 年封他为爵士，并于 1892 年晋为开尔文勋爵。1890—1895 年任英国皇家学会会长。1877 年被选为法国科学院院士。1904 年任格拉斯哥大学校长，直到 1907 年 12 月 17 日在苏格兰内瑟霍尔逝世为止。开尔文是 19 世纪杰出的和受人尊敬的自然科学家，他生前把自己最后的长眠之处选在威斯敏斯特教堂，位于牛顿的旁边。

开尔文建立起全英国大学中第一个物理研究实验室，不过这个英国历史上第一个物理实验室却是诞生在一个酒窖之中的。开尔文认为物质和电动力学的数

学理论结果必须用实验来证明。他带领学生进行各种实验来检定和发展新的物理理论。此外，他还利用实验室的精密测量结果来协助指导大西洋海底电缆的铺设工程，使英国与美洲之间的通信得到突破性的发展。

对于学生来说，开尔文是一位"冷热无常"的教授，经常没有人知道他会干些什么。有一天，他的朋友、德国物理学家亥姆霍兹来到他的实验室，参观他的陀螺仪实验。此时一个很厚的金属圆盘正在飞速地旋转着，开尔文准备通过这个实验证明，圆盘在旋转中应该是垂直不动的，从而借此用类比的思维来说明，地球相对于其轴心来说也是垂直不动的。突然，他抓起锤子狠狠地敲击圆盘。金属圆盘一下子失去了平衡，向旁边飞了出去，恰巧击中了亥姆霍兹悬挂在衣帽架上的帽子，并把帽子砸破了。同学们哄堂大笑。亥姆霍兹无可奈何，只得也随着大家笑了。开尔文倒是很不在乎，轻描淡写地说："出了点毛病，我会赔你一顶新帽子的。"

开尔文讲课很有意思，他强烈反对照本宣科。他说："我取消了上课宣读发了霉的论文的办法。"他的课堂和实验室里堆满了各种各样的仪器，五花八门。小配件堆在桌子上，有的吊在天花板上，有的还挂在墙上。在讲台一角，天花板上吊着一件看上去平凡无奇的装置——一个覆盖着橡皮薄膜的金属圈，是用来揭示露滴性质的。有一天，他叫人弄一些水来，把水浇在橡皮膜上，使橡皮膜往下垂胀，加了很多的水后，橡皮膜被撑破了，水一直溅到了教室前排学生的头上。开尔文笑了，说："我向来喜欢把我的证明浸透到你们的心里去。"

开尔文的兴趣一向在热力学和电学方面。热能的研究使他认识了一个可能最低的温度，即绝对零度——－273.15℃。他把这个温度点当作一个新的温度和温标的出发点。早在1787年，法国物理学家查理就发现，在压力一定时，温度每升高1℃，一定量气体的体积的增加值（膨胀率）是一个定值，体积膨胀率与温度成正比关系。最初的实验得出该定值为气体在0℃时的体积，后来经许多人长达几十年的实验修正，特别是由于1802年法国人盖-吕萨克所做的工作，最后才确定了该值。

1854年，开尔文进一步指出，只要选定一个固定温度——"水的三相点"，即水、冰、水蒸气三相共存的温度，温度值就完全可以确定下来，这是因为另一个固定点——"绝对零度"已经确定下来。把绝对零度到水的三相点温度等分为273.16份，每一份就是1开氏度，这就是开氏温标（又称热力学温标）。热力学温标的单位取为"开尔文"，简称"开"，用"K"表示。热力学温标的分度间隔和摄氏温标的间隔是一致的。

蒸汽机的发明

第一部活塞式蒸汽机是1690年法国人巴本（1647—1714）在德国发明的。巴

本的蒸汽机是由一个直径约 2.5 英寸、装有活塞和连杆的竖式管子构成的。管子下部盛水,加热使水变成蒸汽,蒸汽推动活塞向上运动。活塞上升到顶部时,被插销固定住,移去热源,蒸汽冷凝,汽缸内形成真空。拔去插销,上部大气压力驱动活塞,使它向下运动,并通过杠杆提起重物。竖式管子完成了锅炉、汽缸和凝汽器三重功能。巴本认为这种机器可以用于排除矿井积水、推进船只等。巴本第一个应用蒸汽在汽缸中推动活塞,并指出了蒸汽机的工作循环,为以后活塞式蒸汽机的发展开辟了道路。

17 世纪末,英国皇家工程队的军事工程师塞维利(1650—1715)进行蒸汽泵的研制。蒸汽泵在结构上是去掉活塞的巴本活塞式蒸汽机,直接依靠真空把水吸上来,再用蒸汽的压力把水挤出去。1698 年,塞维利取得这项发明的专利。塞维利蒸汽泵在一些矿井、私人供水装置和磨坊里得到应用。但因为蒸汽压力不够,用于排除深井积水时遇到了困难,因此不能在矿山上普遍推广。然而“塞维利机”是人类历史上第一部可以实际应用的蒸汽机。

英国铁匠托马斯·纽可门(1663—1729)综合了塞维利机和巴本机的优点,发明了空气蒸汽机(图 2-66),并于 1712 年应用于矿井排水和农田灌溉。它的基本构造是:用一只活塞往返于封闭的圆筒汽缸,活塞借一根杆系于一根摇动的横杆一端,横杆另一端连着排水泵。低压蒸汽先引进汽缸,然后喷洒少量的水使其冷凝,这样就在汽缸里造成局部真空,使大气压作用于活塞,活塞就把横杆向下拉,使排水泵动起来。这部机器成为一个把热变为机械力的原动机,但和塞维利机一样,都有耗煤量大、效率低、只能做往复直线运动的缺点。

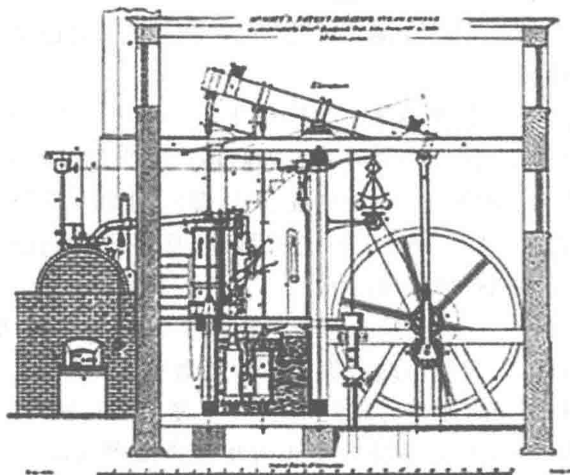


图 2-66　纽可门蒸汽机

对纽可门机进行全面研究和改进的是英国工程师斯米顿(1724—1792)。他改进了锅炉和点火燃烧的方法。由于斯米顿的努力,纽可门空气蒸汽机的效率几乎提高了一倍。然而,把汽缸又用作凝汽器的结构缺陷造成热的大量浪费,使得它的效率仍然很低,只有1%左右。

瓦特与蒸汽机的改进

在蒸汽机的发明史上做过决定性贡献的,是被人们誉为"蒸汽大王"的詹姆斯·瓦特(1736—1819,图2-67)。瓦特的主要功绩是对蒸汽机进行了重大改进,使蒸汽机成为工业提供了强大的动力机。



图 2-67　瓦特像

瓦特是英国著名的发明家,是第一次工业革命时的重要人物。1736年1月19日,瓦特出生于苏格兰格拉斯哥附近、克莱德河湾上的港口小镇格林诺克。瓦特的父亲是熟练的造船工人并拥有自己的船只与造船作坊,还是小镇的官员。瓦特的母亲出身于贵族家庭并受过良好的教育。瓦特小时候身体较弱,去学校的时间不多,主要的教育都是由母亲在家里进行。瓦特从小就表现出了强大的动手能力以及数学上的天分。

1753年,瓦特17岁。这一年,他的母亲去世了,而父亲的生意开始走下坡路。于是,18岁那年,瓦特到伦敦一家钟表店当学徒。他白天在店里忙碌,晚上就到一位著名的机械师家里学习机械学知识。闲谈中,这位机械师跟瓦特提到了蒸汽机。瓦特对蒸汽机产生了兴趣。回家以后,瓦特尝试自己动手做一些简单的实验,研究蒸汽的性质。

1763年,瓦特在别人的推荐下来到格拉斯哥大学从事仪器修理工作。一次,学校里的一台纽可门蒸汽机坏了,请瓦特去修理。在修理过程中,瓦特发现纽可门蒸汽机有两个很突出的缺陷:一是热效率低,蒸汽的绝大部分热量没有用来做功,而是消耗在使汽缸一冷一热上了;二是活塞只能做往复的直线运动,不能做旋转运动,这就限制了蒸汽机的使用范围。

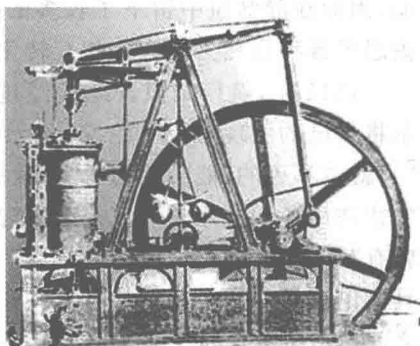
为了提高蒸汽机的效率,瓦特在汽缸外面加上绝热外套,并单独设计了一个和汽缸分离的冷凝器,把做功后的蒸汽引入冷凝器中去冷却,这样就不必用冷水去淋汽缸,从而保持了汽缸原来的高温,避免了反复给汽缸加热的过程,节约了大量的能量。1765年,瓦特已基本完成了带有单独冷凝器的蒸汽机的发明。1774年,瓦特将自己设计的蒸汽机投入生产。

1776年,瓦特在波罗姆菲尔德煤矿首次向公众展示了博尔登-瓦特蒸汽机的

工作状态。博尔登是一家铸造厂的老板，他提供了瓦特绝大部分的研究费用，双方属于一种合作的关系，这种合作一直延续了整整 25 年。

1782 年，瓦特又发明了更大的往复式蒸汽机。它增加了气室，使蒸汽进入汽缸时能自动变换方向，以推动活塞往复运动。后来，瓦特又进一步改进蒸汽机，采用了英国发明家司蒂德发明的一种曲柄装置，可以使往复的直线运动变成回转运动。

瓦特经过自己长期的努力，同时吸收别人的研究成果，终于制成了性能优良的新一代蒸汽机——瓦特蒸汽机(图 2-68)。现在所用的蒸汽机基本上就是瓦特的往复旋转式蒸汽机。它和纽可门蒸汽机相比较，具有明显的优点：煤的消耗减少，机器的效率提高，而且还可以连续工作。瓦特蒸汽机的发明，极大地推动了当时正在英国蓬勃兴起的工业革命，从而使世界工业进入到以大机器工业为特征的蒸汽机时代。


图 2-68　瓦特蒸汽机

1782 年，瓦特还发明了一种标准单位：马力。这是工程技术上常用的一种计量功率的单位。

1800 年，瓦特蒸汽机专利期满，他与博尔登的合作也正式结束，64 岁的瓦特选择了退休。但他们的下一代——马修・博尔顿与小詹姆斯・瓦特继续合作，同时吸收了威廉・默多克为合伙人，保证了公司的持续运作。

1819 年 8 月 25 日，詹姆斯・瓦特逝世，享年 83 岁。

医生的眼光——迈尔的科学发现

从 18 世纪末到 19 世纪上半叶，自然科学上的一系列重大发现，广泛地揭示出各种自然现象之间的普遍联系和转化。诸如，1800 年伏打电堆的发明与随后出现的电解工艺，揭示了电运动和化学运动间的相互转化；1821 年温差电效应与 1834 年其逆效应的发现，揭示了热、电之间的相互转化；1820 年奥斯特电流磁效应的发现和 1831 年法拉第电磁感应现象的发现，揭示了电与磁之间的相互转化，等等。这些重要现象的发现，为能量转化和守恒定律的建立奠定了坚实的事实基础。到 19 世纪 40 年代前后，欧洲科学界已经形成了一种气氛，即以一种相互联系的观点去观察自然现象。正是在这种情况下，有从事七八种专业的十多位科学家，分别通过不同的途径，各自独立地认识到能量转化和守恒定律。


图 2-69 罗伯特·迈尔像

罗伯特·迈尔(1814—1878,图 2-69)是一位德国医生。1840 年,迈尔在一艘从荷兰驶往东印度的船上当随船医生。在船驶近爪哇(今属印度尼西亚)时,他发现患病船员的静脉血比在欧洲时红一些。迈尔联想到法国科学家拉瓦锡的燃烧理论,于是猜想:热带气温较高,人体只需从食物中吸收较少的热量,这使人体中食物的氧化过程减弱,因而在静脉血中留下了较多的氧。这个现象促使迈尔去思考各种自然力之间的相互转化。

1841 年,航行结束。此后经过一年多时间的努力,迈尔将自己的发现写成了论文《论无机界的力》。迈尔认为,"力就是不灭的、能转化的、无重量的客体"。当时还没有"能量"这个专业名词,人们往往用各种各样的"力"来表示现在所说的各种能量。迈尔在文中所说的"力"就有"能量"的意思。迈尔以"下落力"(重力势能)、"运动的力"(动能)与热的转化具体论证了"力"(能量)的转化和守恒。在论文的最后,迈尔提出了确立不同"力"之间数值上的当量关系的必要性,并根据当时测定气体比热的数据,对热转化为机械功的量值(也叫"热功当量")进行了计算。

1845 年,迈尔在《论有机运动与新陈代谢》中,在肯定了力的转化与守恒定律是支配宇宙的普遍规律的前提下,考察了 5 种不同形式的"力",即"运动的力""下落力""热""电"和"化学力",描述了运动转化的 25 种情况,计算出热功当量的数值为 365 千克力·米/千卡,相当于 3.58 焦耳/卡(现在的标准值大约为 4.2)。

焦耳与热功当量

焦耳(1818—1889,图 2-70)关于热功当量的测定,为能量守恒原理的确立奠定了坚实的实验基础。


图 2-70 焦耳像

焦耳是英国物理学家,1818 年 12 月 24 日出生于曼彻斯特近郊的沙弗特。年幼时,焦耳因为身体原因一直在索尔福德附近彭德尔伯里的一个家庭学校里学习。1834 年,16 岁的焦耳和他的哥哥本杰明被送到曼彻斯特文学与哲学学会的道尔顿门下学习。道尔顿给予了焦耳热情的教导,教给他数学、哲学和化学方面的知识,为焦耳后来的研究奠定了基础。而且道尔顿教会了焦耳理论与实践相结合的科研方法,激发了焦耳对化学和物理的兴趣。在道尔顿的鼓励下,焦耳决心从事科学研究工作。

焦耳兄弟俩跟随道尔顿学习了两年，直到后来道尔顿因中风而退休。跟随道尔顿的这段经历影响了焦耳的一生。焦耳后来又受约翰·戴维斯指导。焦耳兄弟俩对电学非常着迷，曾经试着相互电击，还拿家里的仆人做过试验。

焦耳在受道尔顿指导期间，于 1835 年进入曼彻斯特大学就读。毕业后开始参与经营自家的啤酒厂。直到 1854 年卖出啤酒厂。他在经营上都一直很活跃。

焦耳是业余科学家，他很早就关心各种“力”(就是现在所说的能量，在当时被称为“力”)的转化问题。1837 年，焦耳在啤酒厂装配了用电池驱动的磁电机，并对它进行了多方面的实验测试。测试中焦耳注意到电机和电路中的发热现象，他想到这和机器中的摩擦生热应该一样，都是动力损失的来源。这促使他对电流的热效应进行定量研究。他在玻璃管中装入水银，通以强弱不同的电流，测出一定时间内相应的温度变化，从而发现了导体的发热量与电流的平方成正比。他又利用不同尺寸的导体进行实验，发现一定的电流在一定的时间内产生的热量与导体的电阻成正比。

进一步思考后，焦耳认为磁电式发电机的感生电流应该与来自化学电源的电流产生一样的热效应。于是，他设计了一个实验：将一个线圈放在量热器内，并使它在电磁体的两极之间转动，产生感应电流。这个实验完全证实了热可以由磁电机产生。从这个实验中，焦耳领悟到热和机械功是可以互相转化的，在转化过程中应该遵从一定的当量关系。这样，“探求热和失去或得到的机械功之间是否有一个恒定的比值，就成了十分有意义的课题”。焦耳在磁电机线圈的转轴上绕两条线，跨过两个定滑轮后挂上几磅重的砝码，由砝码的重量和下落距离可以计算出所做的功(图 2-71)。他共进行了 13 组实验，得出了一个平均结果：“能使 1 磅(1 磅≈0.454 kg，编者注)水的温度升高 1 华氏度的热量，等于(并可转化为)把 838 磅重物提升 1 英尺的机械功”。这个值相当于 460 千克力·米/千卡。

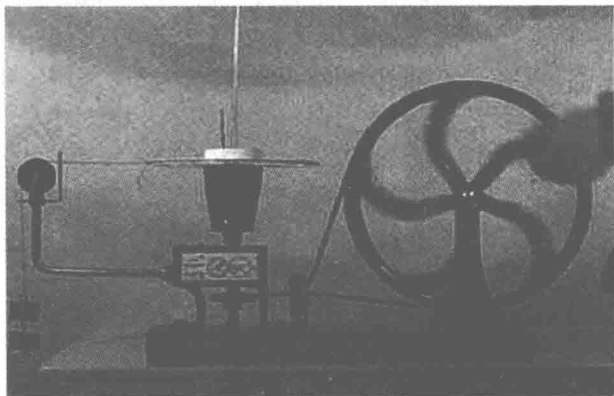


图 2-71　热功当量实验装置

焦耳测定热功当量的工作一直进行到1878年，先后采用不同的方法进行了四百多次实验，最后得到了热功当量值为427千克力·米/千卡，相当于4.18焦耳/卡。焦耳以精确的数据为能量守恒原理提供了无可置疑的实验证明。为了纪念这位物理学家的伟大业绩，物理学中将功和能量的单位命名为焦耳（简称“焦”，符号是“J”）。

不过，焦耳测定热功当量的工作并不是一帆风顺的。

1843年8月21日，焦耳在英国学术会议上报告了他的论文《论电磁的热效应和热的机械值》，他在报告中说1千卡的热量相当于460千克力·米的功。他的报告没有得到支持和强烈的反响，这时他意识到自己还需要进行更精确的实验。

焦耳在1847年再次公布自己的研究成果时，他还是没有得到支持，很多科学家都怀疑他的结论，认为各种形式的能之间的转化是不可能的。直到1850年，其他科学家用不同的方法获得了能量守恒定律和能量转化定律，他们的结论和焦耳相同，这时焦耳的工作才得到承认。

1850年，焦耳凭借他在物理学上做出的重要贡献成为英国皇家学会会员，当时他32岁，两年后他接受了皇家勋章。许多外国科学院也给予他很高的荣誉。

1875年，英国科学协会委托他更精确地测量热功当量。他得到的结果是4.15焦耳/卡，非常接近4.184焦耳/卡。1875年，焦耳的经济状况大不如前。这位曾经富有过但却没有一定职位的人在经济上陷入困境，幸而他的朋友帮他弄到一笔每年200英镑的养老金，使他得以维持中等但舒适的生活。55岁时，他的健康状况恶化，研究工作减慢了。1878年，焦耳发表了他的最后一篇论文。

1889年10月11日，焦耳在索福特逝世。

除迈尔和焦耳之外，这一时期还有不少人进行了这一问题的探索。德国科学家亥姆霍兹还是一个大学生的时候，就通过深入的思考，认识到“永动机是不可能制成的”。正是这个问题，将亥姆霍兹引到了能量转化和守恒定律的发现道路上。

能量转化和守恒定律的发现，生动地表明科学的发展受到社会生产发展和科学内在逻辑发展规律的制约，同时也表明科学家群体力量的强大。恩格斯对能量转化和守恒定律也做过精辟的论述，深刻地分析了定律所包含的内容，并第一次科学地给出了“能量转化和守恒定律”的名称。同时，他还给予了能量守恒思想以极高的评价，称它为“绝对的自然规律”，并把它与细胞学和进化论合称为对建立辩证唯物主义世界观具有决定意义的“三大发现”。

玻意耳-马略特定律的建立

玻意耳-马略特定律是气体定律之一，是玻意耳和马略特两个人分别独立发

现的。他们发现，一定量的气体在温度不变时其体积跟压强成反比关系。

玻意耳(1627—1691，图 2-72)是英国物理学家和化学家。1627 年 1 月 25 日出生于爱尔兰的利斯莫尔。幼年的玻意耳在记忆力和语言才能方面表现出了惊人的天赋。1635 年，只有 8 岁的他进入伦敦西郊的伊顿公学学习。1638 年，只有 11 岁的他随家庭教师一起周游欧洲大陆，先后到法国、瑞士和意大利等地求学。1644 年，他继承了父亲的一笔财产，定居在多尔塞特。玻意耳阅读了自然科学、哲学、神学等方面的大量书籍，还经常参加由他姐姐发起的一些著名科学家参加的聚会，听他们就一些科学问题进行的讨论，但他主张"实验决定一切"。1654 年玻意耳迁居牛津，在牛津大学创立了一个实验室，开始从事系统的物理和化学研究工作。1659 年，他利用助手胡克改进的真空泵开始对空气性质进行研究，1660 年出版了第一部著作《论空气的重量及其物理力学性质的新实验》。1662 年，玻意耳发现了后来以他的名字命名的气体定律。玻意耳是英国皇家学会创始人之一，1680 年被任命为皇家学会会长，但出于身体原因他谢绝了任命，隐居在了祖传的庄园中著书立说。



图 2-72　玻意耳像

由于长期从事化学实验工作，受到化学试剂的影响，晚年的玻意耳身体健康状况很糟糕。1691 年 12 月 30 日，终身未婚的玻意耳因病在伦敦逝世，终年 64 岁。

在物理学方面，玻意耳进行了分子物理、光和电现象、流体力学、声学、热学、力学等方面的研究，成果累累。

玻意耳最突出的贡献是 1661 年发现的玻意耳定律。1659 年，他利用胡克改进的真空泵进行了一系列有关气体性质的开拓性实验。1660 年他将实验结果汇编成册，出版了他的第一部著作《涉及空气弹性及其效果的新物理——力学实验》。他用实验验证了空气是有重量和弹性的物质；论证了空气对于燃烧、呼吸和传声来说是必不可少的；验证了压强对水的沸点的影响，指出当使周围的空气稀薄时热水就能沸腾起来；验证了细管中液体的上升(即毛细现象)是和大气压力无关的(这与当时的观点截然相反)；验证了真空中虹吸失效。玻意耳还研究了空气的比重和折射率等问题。后来，玻意耳在助手的协助下设计实验，通过实验不但证实了"空气的弹性有能力做出远远超过我们需要归之于它的事实"，而且发现了气体的体积与压强的反比关系，在历史上建立起力学运动以外第一个定量的自然定律，即著名的玻意耳定律。

马略特(Edme Mariotte,1602—1684,图 2-73)是法国物理学家和植物生理学家。他出生于法国的希尔戈尼的迪戎城,一生的大部分时间是在这个城市度过的,不过很遗憾的是关于他确切的出生日期和早年的学习生活情况并没有留下任何记录。马略特曾任迪戎附近圣马丁修道院的院长。他酷爱科学,对物理学有着广泛的研究,进行过多种物理实验,从事过力学、热学和光学等方面的研究。他有严谨的科学作风,制成过多种物理仪器,善于用实验证实和发展当时重大的科学成果,是法国实验物理学的创始人之一。马略特是法国科学院的创建者之一,并成为该院第一批院士(1666)。1684 年 5 月 12 日,马略特在巴黎逝世。


图 2-73　马略特像

1676 年,马略特发表了题为《气体的本性》的论文。文中描述了一个重要的发现:一定质量的气体在温度不变时其体积和压强成反比。这个发现是他独立确立的,后来在法国被称为马略特定律。该定律已于 1661 年被英国科学家玻意耳发现,但马略特明确地指出了温度不变是该定律的适用条件,定律的表述也比玻意耳的完整,实验数据也更令人信服,因此这一定律后被称为玻意耳-马略特定律。

热学方面,马略特于 1679 年发现了火的热辐射和光线的区别。他指出,火的热辐射根本通不过玻璃,或者只通过很少一点,而火光却能通过玻璃。他还用一个自制的冰透镜将太阳光聚焦,点燃了放在其焦点处的火药:他先把纯水煮沸半小时以驱除水中的空气,然后将水凝固成两三英寸厚的冰板。这样做出的冰板几乎没有气泡,非常透明。将制作的冰板放在一个球状凹陷的小容器里,并把容器放在火的近旁,不断翻动冰板,使表面的冰熔化,直到冰块的两面都呈球状。再戴上手套握住这块冰透镜的边沿,放在太阳光下面,在透镜焦点附近放上火药,一会儿火药就被点着了。

查理定律的建立

查理(1746—1823),法国物理学家、数学家和发明家,1746 年 11 月 12 日生于法国的博让西。中学毕业后先在法国政府财政部当职员,出于对自然科学的爱好,转而从事自然科学研究,自学成才。查理被富兰克林勇敢探索雷电奥秘的精神鼓舞,对科学实验产生了浓厚的兴趣。他用自己改良的方法重复了富兰克林的实验,引起了科学界的重视,甚至还引起富兰克林的注意。富兰克林后来甚至亲

自去拜访查理，对他的才干和想法大加赞赏。

查理大量收集并亲手制作各种物理仪器，从事电学、热力学、分子物理学等方面的研究和实验。他多次举办各种物理讲座，当众进行物理实验演示，在学术界赢得了相当高的声誉。1783 年，查理与罗伯特兄弟合作，制造出人类历史上第一个氢气球，这个气球是用薄绸制成的，外面涂上橡胶，上升的高度达到了 1 英里（1 英里≈1.609 km）。1787 年，查理发表了有关“电学实验”“温标比较”等的文章。1795 年，查理被选为法国科学院院士，并担任巴黎工艺学院的物理学教授，此后一直从事自然科学研究和教学工作，1816 年任法国科学院院长。1823 年 4 月 7 日，查理在巴黎逝世。

查理在物理学上的重要贡献是发现了查理定律。大约在 1787 年，查理研究气体的膨胀问题时，发现了这一定律。但查理没有发表他的发现，而是由盖-吕萨克偶然知道他的这一结果后于 1802 年发表的。后来，物理学上就把气体质量和体积不变时压强随温度正比变化的定律称为查理定律。

查理与载人氢气球的发展

1783 年 6 月 5 日，蒙戈尔费埃兄弟成功地使无人的热气球升空，在 1 800 m 的高空飞行了 2 300 m。敏感的查理马上意识到这种活动的重要意义，立即投入到这个问题的研究上，并且对其做了改进。他从热空气密度小而使气球上浮升空的道理出发，认为应向气球中充入氢气。他认为氢气比空气更轻，应该更有利于气球的升空。

帮助查理制作气球的是罗伯特兄弟，兄弟俩主要负责制作气球的支架、吊篮，在薄绸上喷涂橡胶，用以做成气球。查理负责准备有关原料，获得气球所需要的大量氢气。



图 2-74　现代的氢气球

1783 年 8 月 27 日下午，在巴黎市中心的练兵广场，查理把他的氢气球释放升空。它升高到 915 m 的高空时，遭遇到了一场暴风雨。45 min 后，降落到 24 km 外一个叫果尼斯的小村庄。当地的农民看到一个怪物从空中突然落下来，惊慌之余用大镰刀和长柄叉攻击它，顷刻间把它砸成了碎片。这是人类历史上第一次成功地完成了氢气球的无载人飞行（图 2-74）。

同年 12 月 1 日，在巴黎的宫廷花园，“查理气球”二度升空，这次有两名乘客：查理和小罗伯特，氢气球飞行了约两个小时，曾上升到 1 600 m 的高度，横越了

43 km，缓缓降落在巴黎北方一个小镇附近，小罗伯特从悬篮中爬了出来。重量减轻之后的氢气球再次升空，这次甚至上升到了 2 745 m 的高度，又继续飞行了十多千米，最后在雷伊塔附近着陆。这是氢气球的首次成功载人飞行。

盖-吕萨克定律的建立

约瑟夫·路易·盖-吕萨克(1778—1850，图 2-75)，法国化学家和物理学家，1778 年 12 月 6 日生于上维埃纳省圣莱昂纳德的一个学者世家。



图 2-75　盖-吕萨克像

盖-吕萨克从小十分受宠，父亲经常向他灌输"家族世代书香，只有努力学习，才对得起家族的荣誉"的观念。所以，他一直用功读书，成绩优良。1797 年，他进入巴黎高等工业学院学习。这所学校学术水平较高，不少著名的专家学者在这里任教，著名化学家贝托雷就在这里讲授有机化学课程。盖-吕萨克勤奋好学，热爱化学专业和实验技术，深得贝托雷等一些教授的赏识。

1800 年盖-吕萨克毕业后，贝托雷请他做自己的助手。通过日常工作的接触，老教授发现这个学生思维敏捷，实验技巧很高，他深信自己发现了一个有培养前途的好苗子。于是，他放心地把自己的实验室交给了年轻的盖-吕萨克，让这个青年协助自己进行科学研究工作。盖-吕萨克非常重视科学观察和实验。他总是认真且及时地把实验数据一一记录下来，每当坐下来的时候，他就全神贯注地研究那些实验现象，分析实验数据。盖-吕萨克往往经过反复思考才谨慎地得出自己的结论。他尊重事实而不迷信权威，因此能够洞察人们所不知的奥秘，发现科学真理。当时，贝托雷正在同化学家普鲁斯特围绕着定比定律进行一场激烈的学术争论。贝托雷让盖-吕萨克以实验事实来证明自己的观点，给对方以驳斥。然而，盖-吕萨克反复实验，但记录到的事实都证明其导师的观点是错误的。他毫不犹豫地将这个结果如实地汇报给老师。贝托雷看完他的实验记录之后，露出了微笑。1809 年，盖-吕萨克升任化学教授。1808—1832 年兼任巴黎大学物理学教授，1832—1850 年任巴黎国立自然史博物馆化学讲座教授。盖-吕萨克在物理学和化学方面都做出了卓越的贡献。

1826 年，盖-吕萨克当选为俄国彼得堡科学院名誉院士。1829 年，他出任法国造币厂首席化验员。1830 年，当选为法国国民议会议员，同年还担任了巴黎植物园的化学教授。此外，他还在 1804 年 9 月 16 日创造了乘高空气球升到 7 016 m 进行实验的纪录。

1850 年 5 月 9 日，盖-吕萨克在巴黎去世。

盖-吕萨克在物理学方面主要从事分子物理和热学研究，在气体性质、蒸气压、温度和毛细现象的研究中都做出了出色的贡献，对于气体热膨胀性质的研究成果尤为突出。1801 年他与道尔顿各自独立地发现了气体体积随温度改变的规律，发现了一切气体在压强不变时的热膨胀系数都相同。这个热膨胀系数在半世纪后由英国物理学家开尔文确定了其热力学意义。

在长期的研究中，盖-吕萨克感悟到怀疑才是科学研究的灵魂，怀疑是创新的亲密伙伴。于是，盖-吕萨克总是带着怀疑的眼光进行新的研究，他曾经考虑过的气体状态问题，后来他又得知许多科学家在这个问题上提出了不同的看法。当时德国著名的科学家洪堡曾就此发表过影响较大的观点，盖-吕萨克便决定认真检查一下这位大科学家的结论，结果发现盛名之下其实难副。于是，他便针对洪堡的错误，提出了尖锐的批评。

批评名家的论文往往能够引起人们的注意，但批评者所得到的批评也往往会比赞扬要多。有人质问盖-吕萨克："勇敢的年轻人，你总不能依靠批评别人在研究界抢地盘吧，你说洪堡的结论错了，那么你说说什么才是对的呢？"盖-吕萨克承认："我现在也不知道什么是对的。"

"那不是笑话吗？你自己不知道什么是对的，又怎么知道别人的就是错的？"盖-吕萨克认为，"这并不奇怪，一个真理的周围是可以有很多的谬误的。"

"无论怎样，你拿不出比别人更好的更具有说服力的结论，人们就很难信服你的说法！"

这种怀疑刺激了年轻气盛的盖-吕萨克。他扑进实验室，没日没夜地进行实验。但是，气体好像在故意捉弄他，每一个实验结论似乎都是不完美的，这让盖-吕萨克苦恼不已。

不过，气体问题又似乎具有无穷的魔力，仍然深深地吸引着盖-吕萨克。经过长时间艰苦实验和繁杂的数据分析，盖-吕萨克最后终于找到了气体受热膨胀的规律：在压强不变时，一定质量的气体的体积跟温度成正比。这就是著名的盖-吕萨克定律。

第三篇

现代物理学

在19世纪末的新发现中，原本始于观察火花放电、后聚焦于阴极射线研究的整个进程的最终结果是发现了电子，X射线与放射性纯粹是这一进程的副产品，却先于电子而被发现，这对于物理学发展而言是很幸运的，它们共同开启了一个新的进程：探索微观世界的秘密。尤其是电子的发现，对于了解原子的组成意义重大：既然物质由原子构成，而电子是从物质中发射出来的，那么，电子一定是从原子中分离出来的，是原子的构成部分，这就否定了原子不可分的观念，为原子物理学的诞生创造了契机。

一、新物理的发端



历史的发展常常是出人意料的。谁能想到，阴极射线的研究会引出这么多重大的发现，使得那些参与了这一接力研究的科学家们绽放出了如此美妙的花朵！他们的发现动摇了“原子不可分”这一绵延上千年的观念。另一方面，对于光的发射与吸收以及光的传播的研究竟然引起了物理学基本理论的危机，但又不能不说这是一个巨大的转机。下文提到的这些人，是现代物理学的先驱者，是创造了现代物理学历史的英雄！让我们记住他们的名字，缅怀他们的业绩，以继承他们的精神！

现代物理学的精神

关于宇宙万物的本原，不同时期有不同的认识，甚至在同一时期不同人认识也不一样。在古希腊，不同的哲学家对此有不同的看法：泰勒斯认为宇宙的本原是水；阿那克西米尼认为是空气；齐诺弗尼斯认为是土；毕达哥拉斯提出万物皆数；赫拉克利特认为是火；阿那克萨戈拉认为，万物的本原是种子，即“同类的部分”，不同的物质种子不同；在种子论的基础上，留基伯、德谟克利特、伊壁鸠鲁与卢克莱修等人提出，万物的本原是不可分的原子和虚空；恩培多克勒认为是水火土气四元素在爱与恨的作用下凝聚或分裂；柏拉图认为理念就是最高的存在；亚里士多德认为万物本原是四元素外加以太……在近代，伽利略公开赞同原子论的世界图景；笛卡儿强调微粒的运动是解释各种物理现象的基础，牛顿接纳了这一思想；莱布尼茨提出了单子论，认为自然物质世界是由普通的不可分的单子组成的；道尔顿则进一步把物质的基本构成归结为原子、分子，建立了科学的原子论；1860 年，人们还根据阿伏伽德罗定律估测出了原子的大小和质量的数量级；而大量不同的原子遵循着门捷列夫的元素周期律排列。在现代，卢瑟福把原子归结为原子核及绕核运动的电子，建立了原子的行星式结构模型；后来，又把原子核归结为质子和中子；再后来，盖尔曼提出，质子和中子都由夸克构成。现在，一个新的理论又开始流行了：万物本原是超弦。

这是一个系列且不断深奥的理论，而理解现代物理学的最好方式，就是要认

识到这样一个事实:现代物理学继承和深化了古代哲学的核心精神——揭示出隐藏在世界万事万物背后的本原。从思想上讲,这也是一条走向统一的发展之路。

总体而言,现代物理学的最大成就是量子力学和相对论的建立。量子力学不仅促进了人类对于原子、亚原子世界的理解,而且深刻地影响了人类的哲学思想基础,更以其对微晶片、超导材料的影响而成为人类理解自然的重要基础;相对论不仅使人类摆脱了绝对空间与绝对时间的禁锢,揭开了原子能的秘密,而且也提供了关于宇宙演化与创世的新见解。量子力学与相对论建成之后,物理学的发展则是以它们为基础的交织发展过程,研究领域已经遍及人们能够想象得到的一切自然领域。与近代物理学相比,现代物理学无论是在思考的深度方面,还是在研究的广度方面,都不可同日而语!著名理论物理学家、诺贝尔物理奖获得者李政道曾经把现代物理学的研究领域概括为五个字:小、大、介、快、杂——"小"到基本粒子,"大"到星体、星系、宇宙,中到"介"观领域如纳米、半导体和超导材料,"快"到甚至连灵敏仪器都无法捕捉的快速过程与粒子形成,以及复"杂"多元的非线性体系,都是现代物理学研究的核心问题。

今天,回望过去一百多年来物理学的发展,可谓波澜壮阔!在这一百余年的发展中,物理学给人类贡献了一大批极具创造力的科学大师,和极富洞察力与想象力的世界图景!现代物理学不仅从根本上改变了人类对于物质世界的认识,更以其深刻的理论成果成为其他科学技术领域的理论基础与方法楷模。这是物理学史上最为丰富多彩的时代,也是对其他科学技术领域最具影响力的时代,对于社会生活领域乃至现代文明已经产生了异乎寻常的影响,以至于 20 世纪常常被称为"物理学的世纪",其影响至今仍在延续。有人提出,21 世纪将是生物学的世纪,但目前来看这还只是生物学界一个美好的愿望,至少在相当长的一段时间内,物理学仍然是对社会贡献最大的学科领域。或许,物理学科的新发现少了,但其应用与延拓却在持续稳步地进行。

19 世纪末的物理"末世"理论危机

现代物理学的产生源于 19 世纪末经典物理学的理论危机与新事实的发现(X 射线、放射性与电子),它们共同促成了新理论的诞生。

在 19 世纪末,近代物理学获得了全面的发展,形成了力学、光学、电磁学和热学等完整的体系,相对于其他科学技术领域而言,已是硕果累累、威力无比,以至于在物理学家中间产生了一种自豪甚至自满但也多少有点无可奈何的情绪,比较典型、常被人们提及的事件至少有三个:一是电磁波理论的建立者麦克斯韦所生活时代的一种流行的说法,认为科学的完善性已经大功告成,物理学家们只需要

对一些主要物理常数的小数点后面若干位进行修改就行了，麦克斯韦在极力平息这种看法；第二个典型的事件是量子理论的开创者普朗克在他 17 岁决定主攻物理学时得到的劝告，当时是 1875 年，普朗克的老师、慕尼黑大学的约利教授告诉他说，在这一学术领域中，已经没有什么本质上新的东西有待发现了，投身在这一领域实在太可惜；第三个事件，也是最为著名的一个典型，是著名英国物理学家、热力学温标(绝对温标)的发明者、热力学第二定律的提出者之一开尔文勋爵在 1900 年的英国皇家学会的新年致辞中，不无乐观地宣称："在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。"在他的心目中，物理学已经很完美了，物理学家们今后也就无事可做了。不过，他又不无忧虑地指出："但是，在物理学晴朗天空的远方，还飘浮着两朵小小的令人不安的乌云。"他指的是当时还无法解释的两个问题：黑体热辐射问题和迈克尔孙-莫雷实验所涉及的以太问题。其实，这两朵乌云被开尔文小视了，它们根本不小，已经使近代物理学陷入到深刻的危机之中。正是这两朵小小的乌云，最终酿成了倾盆大雨，掀起了一场物理学发展史上的风暴：一朵诞生了量子论，一朵诞生了相对论。

从本质上来说，这两朵乌云都与光有关：前者涉及光的发射与吸收，与当时工业发展中用光学方法测量冶炼炉内温度的需要有关；后者涉及光的传播，与麦克斯韦电磁波理论及传播媒介问题有关。首先，众所周知，物体在被加热时都会发光，当温度达到一定程度时发出的是可见光，而且随着温度的升高光的颜色也随之而变，由红变黄、变白甚至变蓝；但是，过低的温度下物体发出的是看不见的电磁波。据此，物理学家们可以根据光的颜色来判断冶炼炉里的温度，天文学家们可以根据对星光光谱的分析来判断恒星表面的温度，甚至根据宇宙背景的射线光谱来判断宇宙背景的温度。而表面极暗极黑的物体是极为有效的电磁波辐射体，理想、完美的辐射体称为黑体(图 3-1)，经典热学理论和经典电磁理论恰恰在黑体辐射问题上栽了个大跟头，理论描述与实验结果完全不符，是物理学天空中的一朵大乌云(根本就不是"小小的乌云")，显示出经典理论面临着重大危机。其次，关于光的传播，一方面，麦克斯韦的电磁场理论不仅断言光就是一种电磁波，而且认为其传播速度与观察者的速度无关，这与同是经典物理学的伽利略速度加减定律相矛盾，显示出了经典物理学内部的不协调，令人感到困惑；另一方面，为了解释光的传播，人们假想有一种特殊的物质——以太充当光的传播媒介，但迈克尔孙和莫雷的实验否定了以太的存在，又把人们送进了难以理解的深渊，

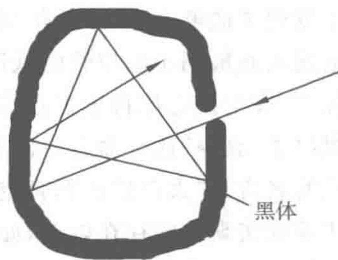


图 3-1　黑体辐射的示意图

这使物理学陷入到了另一个更为深刻的危机之中。这样两个巨大的危机，似乎要使物理学处于万劫不复的境地了！

阴极射线的争论

如果说，物理学理论的危机给物理学界带来的是悲情，那么，19 世纪末物理学的 3 个重大发现带来的则是激动人心和欢欣鼓舞，它们为即将来临的物理学变革提供了基本的变革动力和事实基础，它们是物理学家们在半个世纪的接力研究中所获得的重大成果，始于火花放电的观察，聚焦于对阴极射线的研究，得益于真空技术的进步。

1836 年，英国科学家法拉第重新注意到了被人们遗忘很久的真空放电现象，在进行低压真空管的放电实验时观察到，在阴极周围的辉光区域和紫色的阳极光柱之间存在黑暗部分，即法拉第暗区。这引起了众多科学家的关注和研究兴趣，使低压真空管的放电与发光研究成为 19 世纪后半叶的重要研究领域。当然，真空放电的正式研究是从德国物理学家普吕克尔(1801—1868，图 3-2)开始的，并因变压器技术与真空技术的巨大进步而推动了研究进程。关于变压器技术，在 1851 年有了一个重大的突破：这一年，德裔法国科学家鲁姆科夫在法拉第、亨利和卡兰等人的基础上发明了能够产生 20 千伏高压的感应线圈，它是一个变压器，用它产生了火花放电现象并被用于真空管的低压气体的放电与发光研究。关于真空技术，说来就话长了：真空概念源自于古希腊，原子论者把世界看成是由原子和虚空构成的，从而提出了“真空”这一命题。但亚里士多德认为，真空是不存在的，宇宙充满了以太，他的名言是“大自然厌恶真空”。到近代，自托里拆利、帕斯卡和格里凯等人通过实验证实真空的存在以来，如何获得真空成了一个重要的技术问题，导致了真空泵的发明和不断改进。到 1854 年，真空技术也有了一个重大突破：德国发明家盖斯勒(1814—1879)在普吕克尔的指导下发明了水银真空泵，由此把低压气体放电管抽成高真空后充入各种不同的稀有气体进行放电，发出了颜色各异、绚丽多彩的光。这些彩色玻璃管被普吕克尔称为“盖斯勒管”，是如今广为流行的霓虹灯的前身。



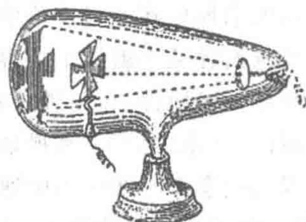
图 3-2　普吕克尔像

普吕克尔是德国数学家和物理学家，是真空放电问题的最早研究者。他的前半生主要从事纯粹数学的研究，在代数曲线论和解析几何领域做出了重要贡献，

发现了普吕克尔公式。从 1847 年开始,他的注意力转向了物理学,指导盖斯勒制成了“盖斯勒管”,并用它实现了真空放电。他的最大成就是在 1858 年发现了阴极射线。盖斯勒是德国发明家,在玻璃吹制方面技艺精湛,他根据托里拆利真空原理发明了水银真空泵,大大地推进了真空技术的发展。以前,物理学家们也用真空器进行放电研究,但皆因真空度不够而不能做出重大的发现。盖斯勒管的产生,使得电与原子的研究迈出了重要的一步,为后来 J.J. 汤姆孙发现电子创造了条件。普吕克尔还发现因射线而产生的荧光位置会因磁场的作用而移动,而且伴随着荧光而产生电荷。

普吕克尔在利用盖斯勒管研究放电现象时,偶然发现从阴极发出了一种“光流”,使正对阴极的管壁上发出了绿色的荧光。1869 年,普吕克尔的学生希托夫证明,利用放在阴极与玻璃壁之间的障碍物,可以在玻璃壁上投射阴影,由此推断射线是直线传播的;此外,他还发现光流能被磁场偏转。1871 年,德国另一位物理学家哥尔德斯坦把这种光流正式命名为阴极射线。1871 年,英国物理学家瓦莱根据阴极射线被磁铁弯曲的事实推测,这种射线是由带负电的物质微粒构成的。

从 1873 年开始,英国科学家威廉·克鲁克斯经过 6 年时间的研究,不仅发明了辐射计,而且改进了真空泵,抽出了比过去更好的真空,并发现在比法拉第暗区更靠近阴极、极为接近阴极的地方存在着黑暗部分(克鲁克斯暗区)。他还把轻小的叶轮放入管中,使它的轴能绕玻璃的轨道旋转,当阴极射线打到叶片时,叶轮沿着轨道旋转,并据此推断阴极射线具有动量(图 3-3),是一种粒子流,这为后来电子的发现提供了基础。但哥尔德斯坦、维德曼和赫兹等德国物理学家认为,阴极射线是一种以太振动即光波。


图 3-3 克鲁克斯管

阴极射线产生的“金蛋”——电子的发现

“阴极射线”究竟是什么?是“光波”还是“粒子流”?人们的争论长达二十多年。可以说,阴极射线的研究成了一只会下“金蛋”的鸡,19 世纪末的新发现如 X 射线、放射性和电子等都与它有关。

1890 年,又一位英雄登场了,他叫约瑟夫·约翰·汤姆孙(1856—1940,他的中文名字更多地被译为 J.J. 汤姆孙,图 3-4)。他是一位英国物理学家,曾任剑桥大学卡


图 3-4 J.J. 汤姆孙像

文迪许实验室的主任。他设计制成新式阴极射线管,并在玻璃管的外侧贴了刻度,以测量光斑的偏转量。1894 年,汤姆孙使用旋转镜发现,阴极射线的前进速度是 1.9×10^7 cm/s,这与光速相比实在是太小了,对阴极射线的光波说是一个致命的打击,有力地支持了阴极射线的粒子说,而且表明这种带电粒子比原子小得多。

1897 年,J. J. 汤姆孙在阴极射线管的两侧增加磁极,使之在管中产生恒定的磁场,并根据阴极射线在电场和磁场中的偏转量计算出了阴极射线粒子所具有的质量与电荷的比值。由此,他断定,阴极射线的载荷体是由比原子还小、质量极小的带负电的粒子所组成。后来,他接受别人的建议,称这样的粒子为“电子”。至此,关于阴极射线的谜底终于被揭开了,它是由电子组成的粒子流!汤姆孙也因此荣获 1906 年度诺贝尔物理学奖。电子是人类找到的第一个基本粒子,而且无所不在;更重要的是,它终结了“原子不可分”的观念,对后来物质构造理论的发展有革命性、突破性的贡献。

汤姆孙出生在英国曼彻斯特附近的契瑟姆镇,他的父亲是一位书商和出版商,经营版本少、年代久远的书籍。受家庭环境的影响,幼年汤姆孙总能从旧书店和旧书摊中找到很有价值的旧书,并一个人安静地阅读。也由于父亲的关系,使得汤姆孙从小就结识了很多大学教授,并在他们的影响下对自然科学有了浓厚的兴趣。汤姆孙 14 岁进入曼彻斯特大学欧文斯学院学习。不幸的是,在他 16 岁的时候,父亲去世了,幸得亲友的帮助和获得了欧文斯学院的一笔助学金,汤姆孙得以继续念书。在学习中遇到新问题时,他总是自己努力,使问题得到解决。1876 年,由于学习成绩优秀,汤姆孙获得数学奖金并被保送到剑桥大学三一学院学习。也因学习成绩出类拔萃,他成了三一学院第二位“斯密斯奖学金”获得者。他听过麦克斯韦讲课,并在麦克斯韦的继任者瑞利勋爵的指导下攻读博士学位,毕业后留在剑桥大学工作。1884 年,他出任卡文迪许实验室主任,年仅 28 岁,此后他领导该实验室长达 35 年。他着手更新实验室,引进新的教授法,尤其是主导了实验室研究方向的转型,创立了一个极为成功的学派,新的发现潮水般地从实验室中涌现出来:电子、云雾室、同位素、射电天文学、基因的 DNA 模型,等等。也有大量学生被培养出来,成为著名科学家。到目前为止,这个实验室已经培养出了二十多位诺贝尔奖获得者,其中包括卢瑟福、威耳孙,还有 J. J. 汤姆孙的儿子乔治·汤姆孙。非常有意思的是,老子汤姆孙发现了电子的粒子性,儿子汤姆孙则发现了电子的波动性。尽管汤姆孙做起实验来有点儿笨手笨脚,但他确是一个实验天才,能够构思出巧妙的实验设计。仪器有故障时,他无需接触仪器,只要看一眼就知道问题出在哪里。他具有丰富的想象力和透彻理解事物的头脑,更有一个

美满、幸福的家庭，他家成了学生们聚会并讨论问题的场所。有一个名叫 C. T. R. 威耳孙的学生发明了“灰尘计数器”，是基于过饱和水蒸气中的尘埃作为凝结核而形成了小水珠这一原理而设计的。有一天聚会时，汤姆孙突然问威耳孙说：“你能不能拍下难以捉摸的电子的照片?”这个惊人的联想力引导着威耳孙奋斗了十余年，最终发明了云雾室，成为高能物理中显示粒子径迹的基本仪器。

佩兰(1870—1942，图 3-5)是法国物理学家和化学家。他的父亲是一名军官，在普法战争中阵亡，他与两个姊妹由母亲抚育成长。1895 年，在军队服役一年后的佩兰成为著名的巴黎高等师范学校的预备生，两年后获得了博士学位。1910 年，他被任命为巴黎大学的物理化学教授。


图 3-5　佩兰像

19 世纪 90 年代，佩兰参与了阴极射线的研究。当时，克鲁克斯已经证明，阴极射线是带电的，是一种粒子流，但持波动说的也大有人在。1895 年，佩兰证实这种射线辐射到一个圆筒时会给圆筒带来大量的负电荷，从而证明了阴极射线的粒子性，一劳永逸地解决了这个问题。

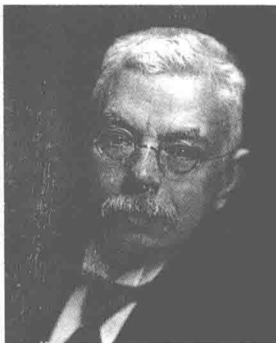
1901 年，佩兰还提出了一个原子结构的模型，认为原子的中心是一些带正电的粒子，外围是一些绕其运转着的电子，电子绕转的周期对应于原子发射的光谱线频率，最外层的电子抛出就发射阴极射线。这已经很像是后来卢瑟福提出的行星模型了，不过佩兰的模型不像卢瑟福的模型那样拥有实验证据的强力支持，因而未得到重视。

佩兰的另一项重要研究是用实验证明原子的存在性。自从道尔顿建立了科学的原子论以来，由于没有任何方法能够看到原子、分子，引起了很大的怀疑。19、20 世纪之交，有很多人包括一些大牌的科学家仍然不相信原子、分子的存在。1905 年，爱因斯坦(1879－1955)从假定布朗运动是微小的悬浮粒子受到周围水分子的不规则撞击的结果出发，得出了决定布朗运动的方程，按照这个方程，布朗粒子克服重力保持悬浮状态的方式取决于水分子大小。1908 年，佩兰运用爱因斯坦的方法通过观测计算出了分子大小，既证明了爱因斯坦理论的正确性，又有力地证明了原子、分子的存在。为此，佩兰获得了 1926 年的诺贝尔物理学奖。

阴极射线产生的另一个“金蛋”——塞曼效应的发现

1896 年还有一个重大发现，是荷兰物理学家彼德 · 塞曼(1865—1943，图

3-6)做出的。


图 3-6　塞曼像

塞曼是荷兰物理学家。他的出生颇为惊心动魄：1865 年 5 月 24 日深夜，荷兰泽兰小岛的拦海大坝突然决堤，霎时，海水倒灌，吞噬了一切，一条无舵无桨的小船上躺着一位产妇，在巨流的撞击下产妇提前分娩了，未来的物理学家塞曼就这样在巨浪中诞生了。他的妈妈咬紧牙关，任凭风浪的颠簸。直到次日午后，人们才将这对母子救起。

塞曼在自然科学方面很有天赋。1883 年，在他还是一个高中生的时候，就仔细观察并记录了北极光，结果发表在著名的《自然》杂志上。1885 年，他进入莱顿大学学习，曾跟随超导现象的发现者卡麦林-昂纳斯及洛伦兹学习，1893 年获得博士学位。塞曼对洛伦兹的电磁理论很熟悉，实验技术也很精湛。在洛伦兹的指导下，他进行了磁场对光谱的影响研究，完成了置于强磁场的光源谱线分裂为三条的实验，证明了洛伦兹关于原子是由带电粒子组成并且会受到磁场影响的看法。基于这一效应，可以推知原子的精细结构乃至恒星磁场的详细情况。于是，人们从单一谱线一分为三这样一个小小的现象，领悟了微观世界和宏观世界的巨大奥秘，物理学的魅力由此可见一斑。

塞曼在把产生光谱的光源置于足够强的磁场中使磁场作用于发光体时，发现光谱发生了变化，一条谱线分裂成了几条谱线，这被称为塞曼效应。他的老师、另一位荷兰物理学家洛伦兹用自己创立的电子论对此给出了理论上的解释。洛伦兹把物体的发光解释为原子内部电子的振动产生的，因此，当光源置于磁场中时，光源的原子内电子的振动将发生改变，使电子的振动频率增大或减小，导致光谱线的增宽或分裂。他们为此共同获得了 1902 年的诺贝尔物理学奖。此外，塞曼还观测到了根据洛伦兹理论所预言的现象，并据此计算出了带电粒子的荷质比(现定名为“比荷”)，与一年后 J. J. 汤姆孙的计算惊人一致。塞曼效应是法拉第磁致旋光效应之后发现的又一个磁光效应，是对光的电磁理论的有力支持。后来人们认识到，塞曼效应是探索原子结构的有用工具，对发光机制的详细了解、泡利原理的发现及电子自旋的发现，都具有决定性的意义。它与原子具有磁矩和空间取向量子化有关，是量子力学的重要实验证据。


图 3-7　伦琴像

伦琴发现 X 射线和克鲁克斯的遗憾

威廉·康纳德·伦琴(1845—1923，图 3-7)，德国物

理学家，出生于莱茵河靠近荷兰边界的伦内普。他从小就喜欢到野外活动和参加手工劳动。1862 年，年满 16 岁的伦琴进入乌德勒支技术学校学习；两年以后，考取了苏黎世科技学校，成为一名机械工程专业的学生，一名未来的机械工程师。在校学习期间，伦琴的老师、物理学教授孔脱希望伦琴能够放弃技术职业方面的学习，专门从事纯科学方面的研究工作。这对于伦琴的前途起了决定的作用。

伦琴于 1868 年取得了机械工程文凭，次年又取得了哲学博士学位。此后，他作为孔脱的助手，从事教学和科学研究。在孔脱的支持与帮助下，加上自己刻苦努力，伦琴取得了极大的进步，他先后被聘为霍恩海姆农学院、斯特拉斯堡大学、乌德勒支大学、维尔兹堡大学等院校的教授。1894 年起，伦琴担任维尔兹堡大学的校长。1895 年，伦琴在前人工作的基础上，继续深入研究阴极射线的有关问题。

也是在 1895 年，德国物理学家伦琴用阴极射线照射玻璃管壁时发出了一种可以透过黑纸使照相底片感光的奇妙射线。它具有极强的穿透力，当伦琴把自己的左手放到玻璃管与屏幕中间时，惊奇的一幕展现在他的面前：他的手指骨清晰地出现在屏幕上，好像用 5 根黑糊糊的干树枝拼凑起来一样。伦琴断定，这种射线绝不是从阴极发射出来的，而是以前人们从未遇到过的一种新的射线。由于不了解它的性质，伦琴把它称为 X 射线。汤姆孙曾经进行实验证明伦琴射线和阴极射线是不同的，因为真空管内的阴极射线没有使照相底片感光的能力。伦琴为此获得了 1901 年的诺贝尔物理学奖，成为获得诺贝尔物理学奖的第一人。后来人们知道，X 射线其实是一种频率极高的电磁波，现在医院里用于透视的医疗机器就是利用了它极强的穿透能力。

关于伦琴，有两个有趣的故事。第一个是说，在他发现了 X 射线时，整个德国轰动了，不久他收到了一封信，向他邮购 X 射线，伦琴在回信中幽默地说：“目前，我手头没有 X 射线的存货，而且邮寄 X 射线是一件相当麻烦的事情，因此不能奉命。这样吧，请把您的胸腔给我邮寄过来吧！”第二个故事是说，伦琴发现 X 射线之后，人们对于这种神秘的射线充满了好奇，他因此经常被邀请去进行演讲。在一次演讲结束之后，主持人对大家说：“请允许我向大家提议：今后将 X 射线定名为伦琴射线，以此来表示对科学家伦琴教授伟大劳动的由衷感谢！”伦琴想说些不同的看法，但他的话被淹没在人们的欢呼之中。伦琴回答了各种各样的问题后表示，“我知道，我会因此而发财致富，但是，我并不准备拍卖这一发现。”一位企业家却困惑不解地直摇头，“为什么您不想以此来赚钱呢？我愿意出 50 万来买 X 射线的专利。”伦琴淡然一笑，“哪怕是 1 000 万！我也不会卖，我的发现是属于所有人的。但愿我的这一发现能被全世界科学家利用。这样，它就会更好地服务于全

人类。"后来，伦琴还把获得的诺贝尔奖奖金赠送给了维尔兹堡大学，用以促进学校科学研究事业的发展。

克鲁克斯(1832—1919，图 3-8)是 19 世纪英国杰出的物理学家和化学家，1848 年进入皇家化学学院学习，1851 年发表了他关于有机化合物的第一篇论文，1859 年创办并主编《化学新闻》。后来，受基尔霍夫研究的影响放弃了有机化学，转身投入到光谱学的研究中。1861 年，他在光谱中发现了一条不属于已知元素的绿线，由此发现了一种新的元素，他把它命名为铊，意思就是"绿枝"。两年后他因此被选入皇家学会。在研究铊的原子量(现定名为"相对原子质量")时，克鲁克斯在真空中称量，以避免大气浮力引起的误差，由此又进入了真空研究领域，创制了克鲁克斯阴极射线管，并对阴极射线的本质进行了深入研究。"克鲁克斯管"使得爱迪生发明日光灯与日光灯的批量生产成为可能。此外，他还发现和研究辐射效应等，发明了辐射计，为后来 X 射线和电子的发现提供了基本实验条件。因对化学和物理学做出的这些重要贡献，他被封为爵士。1913—1915 年出任英国皇家学会会长。


图 3-8　克鲁克斯像

不过，克鲁克斯在研究阴极射线时发现，他使用的一些照相底片模糊不清。他认为，一定是底片出现了质量问题，于是把这些底片退给了厂商。事后的分析表明，其实这是 X 射线在"作祟"，造成了底片感光。他的这一武断看法使得他与 X 射线的发现失之交臂，令人遗憾。这也说明，人们在进行研究时要带着一定的问题意识，而这种意识对实验者的观察会产生影响。

贝可勒尔与放射性物质的发现

1896 年 1 月 20 日，法国著名物理学家、数学家和哲学家亨利 · 彭加勒在科学院每周例会上介绍了伦琴发现的 X 射线，并给大家看了手骨的 X 射线照片。之后，他提出一个问题：是否发荧光的物质在阳光作用下都能发出 X 射线？这个问题引起了他的同胞安东尼 · 亨利 · 贝可勒尔(1852－1908，图 3-9)的极大兴趣，此前，他对磷光和荧光物质研究了多年。彭加勒猜想，X 射线与荧光之间可能有联系。这启发贝可勒尔设计了一个实验。他把能发荧光的铀盐放在用


图 3-9　亨利 · 贝可勒尔像

两张黑纸包好的照相底片上，一起放在阳光下几小时，底片显影后，看到底片有铀盐的黑色轮廓。起先，他认为这是铀盐在阳光的作用下放出的一种像X射线的辐射穿过了不透光的黑纸使底片感光的结果。后来，他准备再重复实验时遇上了连阴雨，只好把铀盐连同包好的底片一同放进抽屉里。天晴后，贝可勒尔准备重新做实验，在检查底片是否因连阴雨而变质时，一个令他吃惊的现象出现了：没有被阳光照射过的铀盐下面的底片同样出现了一个极深的黑色轮廓！也就是说，不论铀盐是否放在阳光下照射，都能发出有穿透能力、使底片感光的射线。这是一个惊天大发现，之后的几个星期里，贝可勒尔对新射线进行了大量研究，发现它不仅能使底片感光，还能使气体电离。而铀盐的辐射强度与铀的含量有关，与铀盐的状态、温度无关，金属铀的射线最强。据此，贝可勒尔断定，新射线与X射线不同，应该是从原子内部发射出来的，是原子本身的自发变化，人们为区别于X射线，便把这种射线称为“贝可勒尔射线”。贝可勒尔发现了天然放射性现象，但他的发现未引起像X射线的发现那样的爆炸性反响，是因为1898年居里夫妇发现镭比铀具有更强的放射性。

对磷光和荧光的兴趣是贝可勒尔家族的传统。亨利·贝可勒尔的祖父安托万·塞扎尔·贝可勒尔(1788—1878)曾在拿破仑手下任职，是第一批从巴黎多科工艺学校毕业的学生，该校与巴黎高等师范学校是法国最著名的两所大学。1815年，拿破仑王朝倒台后，他从军队中退出。他的健康状况不佳，被告知活不多久了(实际上活了90岁)，于是便将注意力转向了物理学，先后成为巴黎自然博物馆的物理学教授和馆长。安托万一生中写了五百多篇论文、6本教科书，其中有两本详细地论述了磷光。他的儿子、亨利的父亲埃德蒙·贝可勒尔(1820—1891)也毕业于多科工艺学校，也在博物馆工作，成为他的助手和教授。埃德蒙研究光的化学作用，是荧光方面的专家，对铀有特别的了解。在伦琴发现X射线时，亨利已经继承了父亲埃德蒙在自然科学博物馆的职位，并担任巴黎多科工艺学校的教授，发表过很多关于磷光与荧光的论文。所以，彭加勒对伦琴发现的介绍马上引起了他的注意。正是家族的传统使他对辐射问题特别敏感。应该说，亨利发现放射性现象是“命中注定的发现”，他们祖孙三代，同为法国科学院院士、先后在同一个实验室、对同一主题相继进行了六十多年的研究工作，以放射性的发现达到了高峰。可喜的是，亨利的儿子，这个家族的第四代传人让·贝可勒尔(1878—1953)也继承了同一职位，这在科学史上是独一无二的。

居里夫妇的贡献

居里夫人(原名玛丽·斯考罗多夫斯卡，1867—1934，图3-10)于1867年11


图 3-10 居里夫人像

月 7 日出生在波兰华沙的一个教师家庭，父亲是一位中学物理学教师，母亲是一所女子学校的校长。本来这是一个幸福的家庭，但那时的波兰处于沙俄统治之下，加之母亲在她 9 岁时因肺病去世、父亲也因不满沙俄统治而被学校解职，生活的艰难可想而知。

这是一个充满爱国热情的家庭，孩子们都像父亲那样，性格顽强，有雄心壮志，关心祖国的命运，不满沙皇的统治。尽管学校规定只能用俄语授课，但玛丽却始终坚持学习波兰语。天资聪颖、有着非凡的记忆力和理解力的玛丽在中学毕业时获得了金质奖章。毕业后，她与姐姐都想去法国求学，可是家里连一个人的费用都付不起。这样，玛丽就留下来做家庭教师，一边挣钱帮助姐姐读书，一边勤奋自修。等姐姐完成学业之后，在 1891 年她 24 岁时，姐姐帮助她来到巴黎，进入了巴黎大学索邦学院学习。她总是坐在第一排的位置，以便听清楚教授所讲的全部内容。1893 年，她以第一名的成绩毕业于物理系，1894 年以第二名的成绩毕业于该校的数学系，并且获得了巴黎大学数学和物理学学位。玛丽的勤勉、好学和聪慧，使她赢得了李普曼教授的器重。在荣获物理学硕士学位后，她来到了李普曼教授的实验室，开始了她的科研活动。就在这里，她结识了物理学家皮埃尔·居里。1895 年，他们结婚了。结婚时，他们没有钱买礼服和戒指，只买了两辆自行车去蜜月旅行。


图 3-11 居里夫妇像

贝可勒尔的发现引起了居里夫人的关注，她把它定名为“放射性”。有一天，她在检查沥青铀矿的样品时，测量到有些混合物的放射性强度比铀和钍强很多倍，这使她感到很奇怪。这种强有力的放射性来自何处呢？经过深入思考，她认为只有一种可能的解释：在这些样品中一定还含有某种数量很少的、放射性非常强的物质。由此，居里夫人预测，在这些混合物里存在着尚未被人们认识到的新的放射性元素。居里夫人的这一想法，对居里也是一个鼓舞，居里决定放下手边的工作，与夫人一起从事新元素的探索工作。他们(图 3-11)试图从放射性最强的沥青铀矿中提取这种物质。

居里夫妇以惊人的毅力，严格按照化学分析的程序，把沥青样品中的各种元素分开，然后对各种元素的放射性进行精确的测定。终于，他们找到了放射性很强的物质，它隐藏在矿石中，而且不止一种，而是两种不同的元素。居里夫人把第

一种确认的元素命名为钋(Po),用以纪念她的祖国——波兰。把后来确定的另一种放射性更强的新元素取名为镭(Ra),这是用拉丁文“放射”(Radaation)一词命名的。

当时人们认为,原子是不可分的,是构成万物的最基本单位。钋和镭的发现,动摇了长期以来学者们所信守的基本理论和已经建立起来的概念。但是,许多物理学家和化学家对这一重要的发现却保持着非常谨慎的态度。居里夫妇为了让人们亲眼目睹钋和镭的实物,决心要把这两种新元素从废矿渣中分离出来。为此,他们经过整整4年的奋斗,终于在1902年,从8 t重的沥青铀矿的残渣中提炼出100 mg非常珍贵的氯化镭,并初步测量出镭的原子量为225。当时看来,镭是地球上一种最奇妙的物质,它不经燃烧就能自发地释放热。镭所放出的热量要比同样质量的优质煤完全燃烧时高出25万倍;镭的放射性强度相当于铀的200万倍。居里夫妇这一研究成果使那些持怀疑态度的化学家和物理学家不得不心悦诚服。这一杰出的研究成果,是居里夫妇在放射性这一新的领域为人类做出的卓越贡献。他们因此与贝可勒尔一起分享了1903年诺贝尔物理学奖。

不幸的是,1906年居里因一次车祸而丧生。这对居里夫人是一个巨大的打击,以致使她有些精神失常。经过一段时间的休养,她毅然承担起了抚养两个女儿的任务,同时她还接受索邦学院的邀请,接替居里的工作,讲授“放射性科学”的课程,并成为巴黎大学第一位女教授。

镭的发现使居里夫人获得了极高的声誉,人们称她为“物理学的皇后”。这是当之无愧的。

危机时期的精神导师

19世纪与20世纪之交,面对理论的危机与三大发现,科学界产生了两种截然相反的心态或情绪:悲观者惊慌失措,伤心、困惑、迷惘和哀叹,认为科学破产了、终结了,没有让人信任的东西了,没有真理的标准了,物理学失去了教育的价值。那个忧心忡忡于两朵“乌云”的开尔文甚至宣称,X射线是一场“精心策划的骗局”,镭的热量是从周围环境中得到的。开尔文老了,不能够理解这些发现的伟大意义,直到他生命的最后(1907年),仍然坚决反对“原子在分裂”以及“物质释放的能量来自于原子内部”的观点。相反,乐观者振臂欢呼,认为一场重大的科学革命即将开启。他们也困惑,但更在困惑中反思,努力寻找未来的出路。他们充分地认识到三大发现的巨大意义,这激发了他们对于物质结构的重新思考的热情,在他们看来,理论的危机与三大发现一起,预示着物理学变革的来临。

在通向变革的道路上,具有哲学头脑的科学家们形成了一个被称为“批判学

派”的科学家群体，他们当中有奥地利哲学家、力学家和物理学家恩斯特·马赫（图 3-12），19 世纪末数学界的领袖、法国哲学家、物理学家和数学家彭加勒，以及被誉为“世纪之交罕见的百科全书式的学者”的英国数学家、生物统计学家、天文学家和科学哲学家皮尔孙等人，他们充当了通往未来的精神导师或精神渡桥的角色。


图 3-12　马赫像

1883 年，恩斯特·马赫出版了具有重大历史意义的著作《力学史评》，完成了对牛顿绝对时空观、力学先验论和机械自然观的彻底批判。在他之前，早在 17 世纪，德国科学家和哲学家莱布尼茨与英国哲学家和大主教贝克莱就批判了牛顿的绝对空间概念，他们暗示，关于空间和运动的彻底相对性概念必将会出现。19 世纪，法国物理学家和工程师萨迪·卡诺（1796—1832）、德国物理学家基尔霍夫（1824—1887）等人也对牛顿力学中的基本概念进行了分析与批判，指出了力的概念的神秘性和不可靠性，但他们的批判都未触及流行的机械观，不可能产生革命性的新观念，只有马赫的批判才是彻底的。马赫指出，世界上的一切事物都是相互联系、相互依赖的，正是利用了事物之间的相互联系，我们形成了时间的概念，而绝对时间无法与经验观测相联系，因而既无实践价值，又无科学价值，是一种无用的形而上学抽象概念。基于同样的理由，马赫指出，参照系是被相对地确立的。因此，他抛弃了绝对空间与绝对运动的概念，认为我们所知道的，仅仅是以事实为立足点的相对时间、相对空间和相对运动。马赫的认识标志着牛顿力学绝对统治时代的结束，对后来爱因斯坦创立相对论产生了巨大的启发性影响，是科学革命行将到来的先声。

1892 年，皮尔孙（1857—1936）出版了《科学的规范》一书，他从引用库辛的名言“批判是科学的生命”开始，对近代科学的基本概念进行了系统的分析与批判，指出：“运动是相对的，从来也不是绝对的”。此外，他还提出了力学定律对微观过程是否适用的问题。

1904 年，批判学派的另一位主要思想家彭加勒应邀在美国召开的国际技术与科学会议上发表演讲时，论述了物理学的危机和对今后发展的期待。他指出，镭以放射性的形式持续放出大量的能量，好像破坏了能量守恒定律；电磁理论包含了违背伽利略相对性原理（速度相加规律）的静止以太的假定，似乎导致了作用与反作用定律被破坏的结果；布朗运动动摇了热力学第二定律的妥当性……所以，应当废弃物理学中的一些原理，对它们进行根本性的改造。随后，在 1905 年

出版的《科学的价值》一书中，他在分析了新实验事实与经典理论的矛盾后指出：物理学有着发生严重危机的迹象，然而我们不必太担心，物理学这个“病人”并不会因此死亡，甚至可以期待这场危机将会有益于健康。“在这个疑云重重的时期，我们可以充分地发挥我们的能动性……建造一种全新的力学。在这个全新的力学中，惯性随速度而增加，光速会变为不可逾越的极限。”彭加勒已经看到了新物理学的曙光，给世界带来了信心，指引着那些富有创造精神的年轻人勇敢地思考与构想新的可能性。

因此，19 世纪与 20 世纪之交是一个激动人心和期待变革的年代，不仅在科学方面，在各个领域到处都有新的大胆思想被提出，甚至无政府主义的暴力行动时有发生。变革成了物理学界的集体期盼，重建物理学的基本原理、探索物质（尤其是原子）的基本结构，成为物理学家共同的重要课题。

所以，危机就是机遇，对于物理学而言，这是新理论诞生的契机、物理学科大发展的前奏和新黎明的开始；对于个人而言，则是一个千载难逢的好机会，谁能够在危机中另辟新径，推陈出新，提出新的可能性，带领人们走出昏暗的沼泽，谁就是新时代的发言人。普朗克和爱因斯坦等一大批思想敏锐的科学家正是新思想浪潮的引领者。在他们的努力下，量子论与相对论应运而生，引发了自牛顿以来物理学最深刻的革命，它们分别提供了人类对于原子与亚原子的世界和高速运动与强引力的世界的系统理解，向着古希腊哲学家们所期望的找到万物本原的发展方向迈出了最为革命性的一步。

二、量子革命:打开微观世界的大门

物理学家们的思维方式是很独特、很出人意料的,他们常常会把一个问题推向极端,在穷途末路之中发现有价值的东西。

理查德·费曼是一位少有的智力天才,量子物理学的重要推手,曾在他写的著名的《费曼物理学讲义》中,提出了这样一个极端问题:

> 如果人类遇到了一场大灾难,所有的科学知识都将被毁灭,只有一句话留传给下一代,那么,怎样才能用最少的词汇来表达最重要的信息呢?

他的回答是:物质是由原子、分子构成的。

费曼的问题很是简单,让人看不清眉目。我们可以换一种方式提出一个类似的问题:假如人类要向遥远的星球发射信息,为了降低发射成本,应当选择一句什么样的话来告诉可能存在的外星人我们地球人最重要的认识成果?

显然,费曼的答案最合适:物质是由原子、分子构成的。

这可能会激发起外星人的求知欲,希望我们继续发射信息,但又无法反馈回来,干脆,我们还是送佛送到西,再发射一次吧!那么,我们应当把什么发射出去呢?

笔者的回答是:原子是由原子核和核外电子构成的。

可以预计,他们可能还会继续追问,原子核又由什么构成?

好吧,不如将好事儿进行到底,索性就接着来吧:原子核是由质子和中子构成的!

这些信息是19世纪末各种射线的发现在20世纪所催生的人类最重要的认识成果。虽然,原子的结构先后经历了卢瑟福的行星模型、玻尔的量子化模型和量子力学的几率模型的发展变化,但它们都有的一个共同点就是:"原子由原子核和核外电子构成"。

受原子不可分观念的影响,19世纪的物理学家们还没有关于原子的构成乃至物质的一般构造的意识,但19世纪末各种射线的发现打破了原子不可分的观念,为20世纪原子物理学和随后量子力学、粒子物理学的诞生创造了契机,使

得古希腊以来物质本原的研究走上了科学探索的道路，世界本原的研究具体地演变成了物质基本构成、物质结构及其运动规律的研究，由此打开了通往微观世界的大门，先后诞生了原子结构理论、量子力学、原子核物理学、粒子物理学与高能物理学、量子场论、规范场论、大统一理论和超弦理论等一系列玄妙的理论。

德意志帝国的崛起与黑体问题

1870—1871年的普法战争以普鲁士大获全胜、法国战败而告终，一个统一的德意志帝国得以建立。由此，改变了欧洲的军事政治格局，德国成为与英国、法国并列称雄的军事强国，它从法国获得了拥有丰富矿产的土地（阿尔萨斯、洛林）和50亿法郎的战争赔款，为其工业发展提供了巨额资金和矿产资源，而战争胜利所激发的对外侵略扩张的野心则促成了大批军事订货，刺激了重工业的发展，使德国经济呈现出跳跃式的发展，迅速完成了工业革命，并极大地促进了德国在冶金技术方面的发展。

与冶金技术相关的辐射物理学问题的研究由此成为德国物理学家们的重要课题，并由于照明技术的照度标准问题进一步使辐射物理学成为德国科学领域重要的研究对象。

关于照度标准问题，要从一次会议谈起：1881年，22个国家的250名代表齐聚巴黎，参加确定电力度量单位的第一次国际会议，会议完成了对伏特、安培和其他一些单位的定义和命名，但在光照度的标准方面未能达成一致意见，开发能效最高的人工照明方式也就成了问题。由此，“烧热的拨火棍问题”或“黑体问题”的研究便成了当时的热门问题，因为人们预期黑体光谱可以作为一种标准，用于对灯泡进行校准和生产，使它能最大限度地释放出光，同时把产生的热限制在最低程度上。

所谓“黑体”，是完全吸收（即无反射和透射）“落”在它上面的电磁辐射的物体。一个空心的球体，内壁涂上吸收辐射的涂料，外壁开一个小孔，就是一个简单的黑体模型，炉子是黑体的一个现实的例子。黑体可以有辐射，人们正是通过黑体的辐射来探知高温炉内的温度的。“黑体辐射”的研究对于当时正在兴起的各种热技术具有重要的意义。

这样，德国由于发展冶金工业和制造业的需要而使它成为黑体辐射研究的主要中心，有一大批实验物理学家前赴后继，从事黑体辐射的精确测量工作，并取得了大批经验结果，如维恩的辐射位移定律等。

非常幸运的是，有三大要素促成了辐射研究的最终成功：

一是有基尔霍夫目标的指引。早在1859年，海德堡大学的古斯塔夫·基尔霍夫(1824—1887，图3-13)就已经开始了黑体问题的研究，他工作的目标是要找到一个公式，能够把任何温度下黑体辐射的光谱能量随光波的波长或频率的分布显示出来。之后其他人的研究，都是受了基尔霍夫这一目标的指引而进行的。

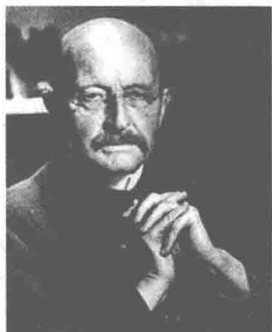

图3-13　基尔霍夫像

二是德国的社会发展为各方面的大力投入创造了条件：普法战争胜利后，作为首都，柏林为争取获得与伦敦、巴黎同样的地位也借助于法国的战争赔款而得以迅速重建。而战争的胜利使德国政府下定决心争当世界第一，不仅是在军事上，更是体现在科技与工业的发展上，要从以生产土豆为主的国家转变为以生产钢铁为主的国家。于是，让新帝国的这座标志性城市拥有一所无与伦比的研究机构的意愿也就出现了。1887年，一所与帝国雄心相称的"帝国技术物理研究所"(简称PTR)在工业家西门子捐赠的土地上建立起来了。这是一所世界上设备最精良的研究所，相当于一个国家的计量局，它的使命是要制定各种标准，测试各种新产品，使德国在对科技的应用方面占据绝对的优势。其中，制定出国际上承认的光照度单位以及黑体研发计划，成为PTR任务清单中的重要项目。

三是一个既有实力、又有革命勇气的人的加入，他就是马克斯·普朗克(1858—1947)，一位深受克劳修斯影响的杰出的德国经典热力学家。

量子论：黑体研究的意外发现

1894年，年仅36岁的普朗克(图3-14)因缘际会，成了柏林物理学家群体的领头成员。他对PTR正在进行的黑体研究项目了如指掌，也知道早些年间基尔霍夫寻找的黑体在任何温度下的辐射能谱与频率(或波长)的关系式一直未被找到。他深知，在黑体辐射问题上，经典物理学久攻不破，已经到了江郎才尽的地步。


图3-14　马克斯·普朗克像

黑体的问题在热辐射技术中是非常基本的科学命题，必须予以解决！普朗克所处的位置赋予了他艰巨的使命，使他着手对黑体辐射问题进行了系统的理论研究。为此，他奋斗了6年，最后，他基于两个已知的实验结果(长波频段的正比规律与短波频段的维恩定律)，用数学上的内插法找到了一个与实验结果符合得很好的

辐射公式，这正是当年基尔霍夫所梦寐以求、众多物理学家苦苦寻找的公式。

但是，问题又来了：这是一个拼凑出来的公式，它意味着什么呢？它所蕴含的物理学意义是什么？如果给不出答案，那这个公式的地位也就大打折扣了，最多只能算作靠运气和直觉发现的一条定律而已。欣喜之余，他又陷入到新的追问中。“除两个热力学定律神圣不可侵犯外，我必须不惜任何代价找到理论解释”，普朗克回忆说，他“做好了心理准备，可以牺牲我过去对物理学法则所拥有的每一个信念”，只要能“找出合理的结果”就行。

最终，他绕过经典物理学的三大理论支柱（力学、电磁学和热力学），采取了一个自称为“拼命”的行动——大有破釜沉舟、壮士断腕的气概——提出了两个非同凡响的假设：

(1)黑体是由带电谐振子组成的（即把组成空腔壁的分子、原子的振动看作线性谐振子），这些谐振子辐射电磁波，并和周围的电磁场交换能量；

(2)这些谐振子的能量不能连续变化，只能取一些分立值，这些分立值是最小能量 ε 的整数倍，即 $\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \cdots, n\varepsilon, \cdots$（其中，$n=1,2,\cdots$，为正整数），而谐振子的最小能量 $\varepsilon=h\nu$ 称为能量子（h 为普朗克常量）。

基于“能量子”的假定，普朗克的黑体辐射公式得到了很好的说明。至此，黑体辐射问题的研究终于画上了圆满的句号。代价是，他背叛了经典物理学。好处是，他创造了一个新的理论——量子理论，第一次把本质上的不连续性引进了物理学。

普朗克深知他的发现的重要性，据说，在他刚刚获得他的结果不久的一次散步中，普朗克告诉他的儿子：他已经发现了可以与牛顿的发现相比拟的东西。当然，这是一次孤注一掷的智力冒险，代价惨重，因为量子假设本身完全颠覆了经典物理学的世界图景。不过，也正是由于这一颠覆，才促成了现代物理学的诞生。

1900 年 12 月 14 日，普朗克在德国物理学会的年会上宣读了标志着量子论诞生的论文，于是这一天也被看作是量子论的诞生日。

普朗克的保守性格

普朗克可以作为一个范例，我们能够从他身上看到德国人所具有的人格品质：诚恳，忠于职守，顽强。他在 1858 年出生于德国的基尔，父亲是基尔大学著名的法律学教授。普朗克先后在慕尼黑大学和柏林大学学习，曾经在著名物理学家基尔霍夫等人的指导下学习，1879 年获得博士学位。1880 年，普朗克成为慕尼黑大学物理学讲师，1885 年被基尔大学聘为理论物理学特约教授。1889 年，在基尔霍夫逝世后，普朗克回到母校柏林大学继任了老师的职位，成为柏林大学的教授，

他在该校一直工作到 1926 年退休。1894 年，普朗克被选为普鲁士科学院院士，1926 年成为英国皇家学会会员，他同时还担任柏林威廉皇家研究所所长。他爱好音乐，钢琴演奏具有专业水准；他还是一名登山运动爱好者，直到晚年仍在坚持这一运动。

普朗克早年的研究工作是在热力学方面，热辐射问题引起了他的注意。1894 年以后，普朗克开始积极投入黑体辐射理论研究。

普朗克走上研究自然科学的道路，在很大程度上应归功于一个名叫缪勒的中学老师。普朗克童年时期就爱好音乐，又爱好文学。后来他听了缪勒讲的一个动人故事：一个建筑工匠花了很大的力气把砖搬到屋顶上，工匠做的功并没有消失，而是变成能量储存下来了；一旦砖块因为风化松动掉下来，砸在人头或东西上面，能量又会被释放出来。……这个能量守恒定律的故事给普朗克留下了终生难忘的印象，并且使他的爱好转向自然科学。

普朗克为人谦虚，作风严谨。1918 年 4 月，在德国物理学会举办的庆贺普朗克六十寿辰的纪念会上，普朗克致答词说：

> 试想有一位矿工，他竭尽全力地进行贵重矿石的勘探，有一次他找到了天然金矿脉，而且在进一步研究中发现它是无价之宝，比先前可能设想的还要贵重无数倍。假如不是他自己碰上这个宝藏，那么无疑地，他的同事也会很快地、幸运地碰上它的。

这当然是普朗克的谦虚。荷兰物理学家洛伦兹在评论普朗克关于能量子这个大胆假设的时候所说的话，道出了问题的本质。他说：

> 我们一定不要忘记，这种灵感观念的好运气，只有那些刻苦工作和深入思考的人才能得到。

普朗克进入科学殿堂以后，无论遇到什么困难，都没有动摇过他献身于科学的决心。他的家庭相继发生过许多不幸：1909 年妻子去世，1916 年一个儿子在第一次世界大战中战死，1917 年和 1919 年两个女儿先后死于难产，1944 年长子参加刺杀希特勒的活动而被处死。但普朗克总是用奋发忘我的工作抑制或转移自己的悲痛，专注于科学研究的工作。他一生发表了 215 篇研究论文，出版了 7 部著作。在普朗克八十周岁生日的庆祝会上，人们“赠给”他一个小行星，命名为“普朗克行星”。1946 年，他虽然体弱，但却非常高兴地出席了英国皇家学会纪念牛顿的集会。

光量子假设：爱因斯坦对量子理论的贡献

普朗克的量子论思想很快被爱因斯坦发扬光大，成功地解释了光电效应问

题，并因此使科学界接纳了连普朗克本人也在怀疑的量子理论。

光照射金属表面时金属原子放出电子的现象，称为光电效应。

光电效应现象是德国物理学家赫兹在 1887 年首先发现的。当时，赫兹在进行验证麦克斯韦电磁波理论的火花放电实验。实验中，赫兹用两套放电电极进行实验，一套产生振荡，发出电磁波；另一套作为接收器。他意外地发现，如果接收电磁波的电极受到紫外线的照射，火花放电就变得容易产生。这引起了广泛的注意，许多物理学家相继进行了实验研究。1888 年，德国物理学家霍尔瓦克斯证实，这是由于在放电间隙内出现了电荷。1899 年，J. J. 汤姆孙用巧妙的方法测量产生的光电流，发现这种光电流和阴极射线都是高速运动的电子流。这样，物理学家就确认，这一现象的实质是由于光(特别是紫外光)照射到金属表面后使金属内部的自由电子获得了更大的动能，因而从金属表面逃逸出来了(此电子因此被称为“光电子”)。1899—1902 年，德国物理学家、赫兹的学生勒纳德(1862—1947)对这一现象进行了系统的研究，并首先将这一现象称为光电效应。

1902 年，勒纳德发现了光电效应的重要性质：各种金属都存在着极限频率，低于极限频率的任何入射光强度再大，照射时间再长，都不会产生光电效应；光电子的最大初动能与入射光的强度无关，只随入射光频率的增大而增大；只要入射光的频率高于金属的极限频率，照射到金属表面时光电子的发射几乎是瞬时的，不超过 10^{-9} s；发生光电效应时，光电流的强度与入射光的强度成正比。

也就是说，光电子的动能只与光的频率有关，与光的强度无关；光的强度的增加只是增加了光电子的数目。

勒纳德对光电效应的研究是与对阴极射线的研究纠缠在一起的，所以，1905 年勒纳德获得诺贝尔物理奖时的原因是由于他对阴极射线的研究。

像黑体辐射一样，麦克斯韦电磁场理论也无法解释光电效应。

普朗克认为，热辐射的能量只有在被吸收和被辐射时是以“能量子”形式作用的，而爱因斯坦在 1905 年进一步假设，光不仅在发射时，而且在传播过程中和与物质的相互作用中，都可以看成“能量子”。爱因斯坦称这个“能量子”为“光量子”。1926 年美国物理学家刘易斯(1875—1946)将它命名为“光子”。

由此，爱因斯坦得出了著名的光电效应方程：

光量子能量($h\nu$)＝光电子初动能(E_{k0})＋光电子的逸出功(W)

这个方程实际上是一个能量守恒定律：光子能量被电子吸收之后，一部分用于挣脱金属的约束做功(逸出功)，剩下的能量转变成电子跑出金属表面时的初始动能。

据此，爱因斯坦很好地解释了勒纳德的观察结果。他指出，射向金属表面的

光，实际上就是一束束的光子流。如果照射光的频率过低，即光子流中每个光子的能量较小，则当它照射到金属表面时，电子吸收了这一光子，它所增加的能量仍然小于电子脱离金属表面所需要的能量，电子就不能脱离开金属表面，因而不能产生光电效应，即使光的强度再高、照射时间再长，也是枉然、无济于事。如果照射光的频率高到能使电子吸收后其能量足以脱离金属表面，剩余的能量就会变成电子的动能，使电子挣脱约束、跑出金属之外，产生光电效应。后来，爱因斯坦因其在光电效应研究上的成果获得了诺贝尔物理学奖。

有意思的是，勒纳德的光电效应被爱因斯坦成功地解释了，但他并不领情，或许是因为爱因斯坦是犹太人，勒纳德心中的日耳曼民族主义情结使他充满了“阶级仇、民族恨”，日后极力反对爱因斯坦的相对论，甚至还成立了“反相对论公司”。到了 1921 年，当爱因斯坦因关于广义相对论的预言于两年前被观测证实而声名显赫的时候，诺贝尔奖评审委员会感到若再不授予爱因斯坦诺贝尔奖实在是说不过去了，于是他们采取了一个折中的办法：在阐述获奖理由时称，爱因斯坦“因对理论物理学的贡献特别是发现光电效应定律而获奖。”这个措辞很巧妙，内涵丰富，暗藏玄机，既安抚了勒纳德，又对得住爱因斯坦，不愧是人类最高荣誉颁发机构做出的！

光电效应在现实生活中有非常重要的应用，已经遍及农业灭虫、医学诊断、探测技术、自动控制（如火警报警器、自动门、照明、安全保护、工业流水线等）、能源科学、卫星动力、军事、人类生活等广泛的领域，而且成绩斐然。例如：

真空光电管、充气光电管等光电子器件在自动控制和检测技术中作用巨大；

光电倍增管能将弱光信号转变成电信号，可以制成光电传感器，已被用于众多高新探测技术之中；

光电导材料、光敏电阻作为一种灵敏、快速的光电器件，成为自动控制和探测技术不可或缺的材料；

光电导探测器与光纤维技术相结合而制成光纤维探测器，具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、灵敏度高、重量轻等诸多优点；

太阳能电池作为太阳能转化为可用能的有效手段，已经成为当今能源危机时代能源科学的重要发展方向。

现在，城市照明系统、太阳能发电站、电动车乃至卫星驱动装置等，随处都可以让我们看到光电效应的影子。

抛开这些广泛的应用暂且不提，在此我们要重申，不要忘了爱因斯坦当初对光电效应的解释的量子理论意义：正是爱因斯坦临门这一脚，才使人们彻底接纳了量子理论，并为后来的各种应用奠定了理论基础。此外，爱因斯坦认识到，光在

光电效应现象中表现出粒子性，但在干涉、衍射现象中表现出波动性，而波动性是不能抹杀的。所以，爱因斯坦说，光具有“波粒二象性”。但是，光到底是粒子还是波？他的回答是，这要看它处在什么样的环境中。

原子结构研究简史

“吾爱吾师，吾更爱真理！”古希腊大哲学家亚里士多德的这句名言道出了他与他尊敬的老师柏拉图有了观念上的分歧时所表现出的勇敢态度和精神。这在近代科学诞生以来也演变成了科学家在科学研究中应有的态度。我们可以看到，在现代原子结构理论的研究中，科学家们一次又一次地践行了亚里士多德的精神。

原子结构的研究是在19世纪末电子的发现和其他射线发现的引导下进行的，这个共识就是：原子不可分的观念必须被抛弃！这样，探索原子的基本构成和基本结构成为20世纪初的一大风潮，大大推动了对原子的认识，并且出现了各种各样的原子模型。

1901年，法国物理学家佩兰提出：原子的中心是一些带正电的粒子，外围是一些绕转着的电子。这已经很像后来卢瑟福的“行星结构原子模型”了。只是由于这一模型缺乏强有力的实验依据、仅仅是一种理论假设而未能流行起来。

1902年，英国著名物理学家开尔文勋爵提出了一种新的原子模型，他把原子看成是均匀带正电的球体，里面埋藏着带负电的电子，正常状态下处于静电平衡状态。这是一种“实心带电球原子模型”。

1903年，日本物理学家长冈半太郎(1865—1950)提出原子结构的“土星模型”，即原子中间是一个带正电的球体，周围有许多聚集在一个个环绕中心球体的圆环上运动的电子。他试图用这些电子的振动来解释原子发光产生的光谱线，但结果不能令人满意。更为严重的问题是，电子之间强烈的库仑斥力会导致“土星环”不稳定。

1903年，J.J.汤姆孙在开尔文模型的基础上提出，原子含有一个均匀的阳电球，若干阴性电子在这个球体内运行。模型中的电子分布在球体中，有点像葡萄干点缀在一块蛋糕里，因此很多人把汤姆孙的原子模型称为“葡萄干蛋糕模型”(图3-15)。这个模型是电中性的，而且对说明阴极射线的发生极为方便，甚至还估算出了原子的大小，成为第一个引起广泛关注的原子结构模型。汤姆孙试图用这个模型解释元素周期表，但未成功。

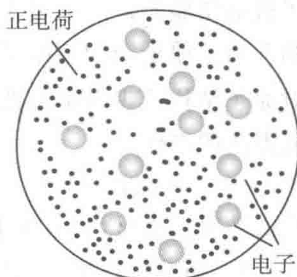


图3-15　J.J.汤姆孙的原子模型

原子结构理论实质性的发展，是出生于新西兰的英国物理学家、J.J.汤姆孙的学生卢瑟福于1911年提出了有核模型或称为“行星模型”。卢瑟福的模型之所以重要，是因为它是建立在α粒子散射实验基础上的，这一散射现象是汤姆孙的模型无法解释的。“吾爱吾师，吾更爱真理”的亚里士多德精神在卢瑟福这里也得到了体现。

随后，卢瑟福的学生、丹麦物理学家尼尔斯·玻尔修改了卢瑟福的模型，提出了原子结构的量子理论。又是一曲“吾爱吾师，吾更爱真理”的清唱，亚里士多德精神再次体现。

最后，更加正确的原子结构图景是由量子力学给出的“电子云模型”：电子在核外的运动是随机的，其几率分布形成了一个类似于云团的结构。量子力学主要是由玻尔的学生们所创建的，这是一曲“吾爱吾师，吾更爱真理”的大合唱。整个过程中，亚里士多德精神大放异彩！

从产生影响的汤姆孙葡萄干蛋糕模型开始，到有实质性意义的卢瑟福行星模型，再到玻尔量子化模型，最后到现代电子云模型（准确地说是“几率模型”），原子结构的研究总算功德圆满了。

卢瑟福：原子的核式结构模型

欧内斯特·卢瑟福（1871—1937，图3-16）是20世纪最伟大的实验物理学家。他不仅深刻地影响了20世纪物理学的发展，还改变了人们对原子世界的基本看法。在卢瑟福一生的科学研究中，他始终大力倡导以扎实的科学实验为基础，并身体力行地将理论与实验紧密结合起来。他毕生都在探索原子的组成和结构，并为此做出了一系列划时代的贡献，其中α粒子散射实验是卢瑟福最杰出的工作之一。借此，卢瑟福开启了原子物理和原子核物理研究的大门，带来了对原子结构认识的革命性突破，而且α粒子的散射实验也成为体现卢瑟福科学研究方法的杰作。



图3-16　卢瑟福像

1909年初，有一天，卢瑟福来到了他的助手盖革的房间，了解α粒子散射实验的情况。这时，实验室来了一位新人、卢瑟福的同乡（新西兰人）马斯顿（1889—1945）。马斯顿在实验工作上很认真，这一天的事情给马斯顿留下了深刻的印象。在后来的回忆中，他写道：“卢瑟福走进房间，当时我们正在那儿计数α粒子，他转向我说：‘你们用一块金属表面直接反射α粒子，看能否得到什么效果。’我不以为

他所期望的会得到什么结果，但这个'预感'正如其他诸多'预感'一样，说不定会使我们观察到一些东西……令我惊奇的是，我确实观察到了期待中的效果……我清楚地记得一星期以后，我在通向卢瑟福私人房间的楼梯上遇到他时，向他报告了这个结果。"

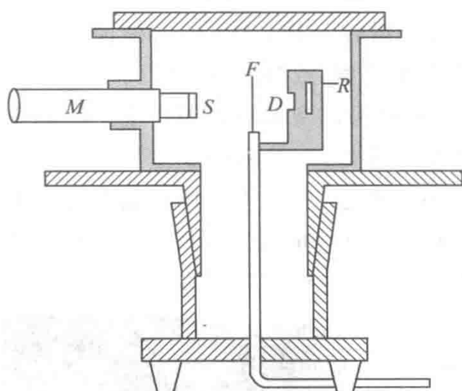


图 3-17　测定 α 粒子散射实验的装置

α 粒子散射实验装置如图 3-17 所示。在抽成真空的容器内，用一铅块 R 包围着 α 粒子源，发射的 α 粒子经一细的通道 D 后，形成了一束射线，打在一片厚度约为 0.000 4 mm 的金属箔 F 上。当穿过金属箔的 α 粒子打到玻璃片上，即涂有硫化锌荧光物的屏 S 上时，就会产生微弱的闪光。通过放大镜 M 观察闪光就可记下某一时间内在某一方向散射的 α 粒子数。放大镜、荧光屏与外壳制成一体，可以转到不同的方向对 α 粒子进行观察和计数。

总的实验结果是，α 粒子受金属箔散射时，绝大多数如以前所观察到的那样，平均只有 2°至 3°的偏转，也就是说，大多数 α 粒子是径直穿过的，但有 1/8 000 的 α 粒子偏转大于 90°，其中有的接近 180°。根据汤姆孙的葡萄干蛋糕模型，α 粒子经过一定厚度的金箔后，从统计效果看，最多只有 1% 的 α 粒子偏转角度超过 30°，而大角度(90°或 90°以上)散射的几率只是 $1/10^{3\,500}$(这意味着基本上是不可能的)。但实验结果表明，约有 1/8 000 的 α 粒子发生了大角度散射(图 3-18)，甚至有的 α 粒子被倒撞回来(发生接近 180°的大偏转)，这种情况确实令人大吃一惊。用卢瑟福的话来说，"这是我一生中从未有过的最难以置信的事件，它的难以置信好比你对一张纸射出一发 15 英寸的炮弹，结果却被反射回来而打在自己身上"。

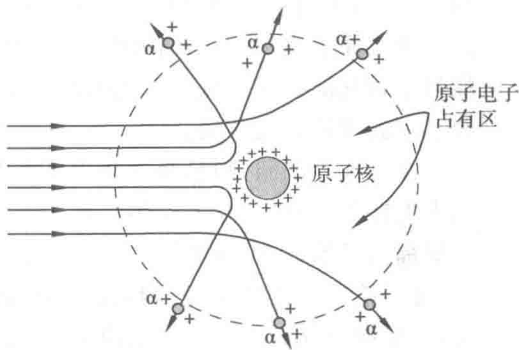


图 3-18　α 粒子的散射示意图

面对 α 粒子的散射实验，从表面上看，卢瑟福是平静的，而且竟然平静了一年。一年后，卢瑟福提出了著名的"卢瑟福散射"公式，与盖革和马斯顿后来(在

1912 年底)的实验符合得很好。更为重要的是,卢瑟福初步提出了与汤姆孙不同的原子结构模型——原子的核式结构模型(图 3-19)。该模型认为:原子的大部分体积是空的,中心有一个体积很小的原子核,原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核内,带负电的电子则在原子核周围沿着不同的轨道运转,就像行星环绕太阳运转一样。所以,这种模型也被形象地称为"太阳系模型"或"行星模型"。

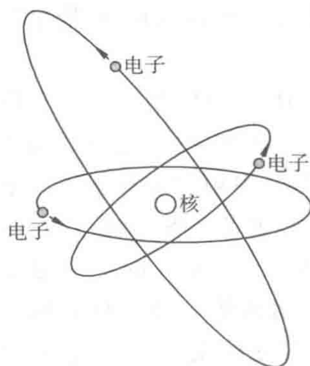
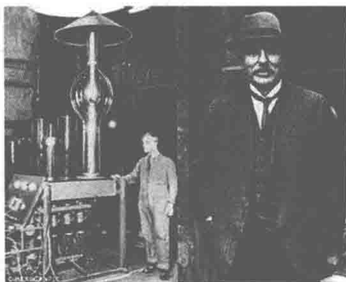


图 3-19　卢瑟福的原子模型

卢瑟福的原子结构模型未能立即产生广泛的影响,这使他很不安。幸好,卢瑟福的学生尼尔斯·玻尔接受了这一理论,并于 1913 年以卢瑟福的有核原子模型为基础建立了成功的氢原子结构模型,才使卢瑟福的有核原子模型受到了应有的重视。

卢瑟福(图 3-20)所处的时期是 20 世纪英国物理学的巅峰时期,很多科学家都认为,卢瑟福是当时能与玻尔和爱因斯坦并驾齐驱的最伟大的科学家。


图 3-20　卢瑟福在实验室

卢瑟福的研究还有一个重要的方法论意义:在卢瑟福之前,人们只能通过元素的光谱数据和化学性质来了解原子内部的构造。只有在放射性被发现并被卢瑟福等人区分出了 α 粒子、β 粒子的性质之后,才有了适用的粒子(射线)束源,从而产生了卢瑟福运用碰撞(散射)手段来研究原子内部构造的探测技术,使得原子结构研究有了真正的进展。现代高能粒子物理的研究领域所采用的基本技术手段是各种类型的粒子加速器,正是承续了卢瑟福的研究方法。

在上大学期间,卢瑟福表现出了非凡的才能,他对物理格外有兴趣。卢瑟福的人生转折点发生在 1895 年。这一年,他考取了去剑桥大学留学的资格。当时,卢瑟福考了第二名,而剑桥大学只录取一名学生,按说,他是留学无望了。幸运的是,考了第一名的学生身处热恋之中,正在准备着结婚,放弃了去剑桥大学的念头,于是幸运降临到了卢瑟福的头上。这是卢瑟福之幸,更是科学界之幸、世界之幸,换了别人,能否做出他那么大的贡献实在难说。据说,收到录取通知书时他正在地里刨土豆。这时,他甩掉了手中的土豆,高兴地说道:"这是我要挖的最后一个土豆了!"到了剑桥,卢瑟福成了汤姆孙的研究生。汤姆孙很快就发现这个新西兰人很有才能。他虽是个大嗓门,看上去大大咧咧的,性格粗犷,但非常聪明,手

也很灵巧，自然受到汤姆孙的器重。

在世纪之交放射性研究的大潮下，卢瑟福投入了大量精力，紧紧追随最前沿的研究进展，1902 年时他曾写给母亲一封信，信中说："我必须不断努力，因为在我所从事的领域中总有许多人在研究探索，我必须尽可能迅速地发表目前的研究成果。这一领域中最优秀的研究人员是巴黎的贝可勒尔和居里夫妇。在最近几年中，他们就放射性这一课题做了大量而重要的工作。"可见，卢瑟福意识到，必须要紧紧跟随贝可勒尔和居里夫妇的工作。相比之下，卢瑟福的新成果是区分了 α 射线和 β 射线，并且弄清楚了 α 粒子的成分。

开始，有人猜测，α 射线可能是中性的，在磁作用下这种射线应不会发生偏折。然而，1903 年，卢瑟福却发现，α 射线的路径在磁作用下发生了弯曲，并且发现射线所带的电荷电性为正电荷。最初，卢瑟福怀疑由钋原子发射的 α 粒子与由镭原子发射的 α 粒子不是同样的粒子，即它们各自的"荷质比"(e/m)值可能不一样。为了弄清楚 α 粒子的"身份"，卢瑟福在 1903 年设计了一个"电磁偏转实验"，并确定了 α 粒子的性质。他设计的实验非常巧妙，加上磁场后，使 α 粒子发生了偏转，进而确定 α 粒子的"荷质比"值。

在 α 粒子研究的同时，卢瑟福借助 α 粒子这一"利器"开辟了一个新的领域，正如他自己所说，他不仅处在一波浪涛的浪尖之上，并且还能推波助澜，是个"弄潮儿"。1907 年，卢瑟福在曼彻斯特大学任教，他与他的新助手盖革(1882—1947 德国科学家，以发明盖革计数器而闻名)合作完成了一个意义重大的实验：α 粒子的散射实验。1908 年，除了与卢瑟福联合发表的有关 α 粒子电量的文章，盖革还独自发表了 α 粒子散射的文章。在关于 α 粒子散射的最初文章中，盖革使用的辐射源是溴化镭($RaBr_2$)，散射物质是金箔和铝箔，检测和计数则利用闪烁物质。这时盖革已经发现："某些 α 粒子被偏折到一个相当大的角度……更充分的研究将使我们能够从理论的观点探索这一结果。"

1908 年，最令卢瑟福高兴的是，他获得了该年度的诺贝尔化学奖。

在瑞典领奖时的一次午餐会上，一位数学家曾预言，卢瑟福还会做出更多的新发现。有趣的是，这位数学家的"预言"竟然应验了，卢瑟福在 3 年后做出了他一生中最大的科学贡献：提出了原子的核式结构模型。

玻尔：原子结构的量子理论

卢瑟福的原子核式结构模型准确地反映了原子内部的结构形态，但也随即遭遇到了严重的困难：根据麦克斯韦电磁场理论，原子内部的电子会不断向外辐射能量从而导致电子轨道的缩小，一方面使原子发射出来的光为连续光谱，另一方

面由于电子能量的不断减少使它最终与原子核所带的正电中和而使原子坍塌。但事实却是原子发射的是分立的不连续光谱，而且现实世界的物质是稳定的，并未发生什么坍塌。这些困难，马上被他的学生尼尔斯·玻尔(1885—1962，图 3-21)解决了。


图 3-21　玻尔像

玻尔是丹麦著名物理学家，早年在哥本哈根大学攻读物理学，1911 年以金属电子论的研究论文获得了博士学位，随即来到英国剑桥大学卡文迪许实验室，想跟随 J. J. 汤姆孙从事电子论的研究，但此时汤姆孙对电子论失去了兴趣，于是他于 1912 年转到了曼彻斯特大学。他在卢瑟福实验室工作了 4 个月，这对玻尔而言是具有决定性意义的，因为其时正值卢瑟福提出有核原子理论并组织对这一理论进行检验的时期。玻尔参加了实验工作，他坚信卢瑟福的有核原子模型是符合客观事实的。玻尔指出："这个模型的重大意义在于，可以把原子的化学性质与放射性质区分开来：前者源于外围的电子，后者源于原子核本身。"这年 6 月，他开始酝酿把卢瑟福的原子模型和普朗克的量子论结合起来。同年 7 月，玻尔回到了哥本哈根。

1913 年初，玻尔的好朋友、光谱学家汉森(1886—1956)来拜访玻尔。他曾问玻尔：原子结构和光谱学中的谱线有什么关系？玻尔不熟悉光谱学，并认为光谱学太复杂，不可能从原子结构的基础上做出解释。在氢的光谱研究中，有一个著名的巴耳末公式，长期以来无人能解释。汉森向玻尔详细解释了瑞士科学家巴耳末(1825—1898)的发现，以及谁也无法解释巴耳末经验公式的情况。

这年 2 月，玻尔注意到了德国物理学家斯塔克(1874—1957)的话："一个光谱的全部谱线是由单独一个电子造成的，是在这电子从一个(几乎)完全分离的状态逐次向势能最小的状态跃迁的过程中辐射出来的。"斯塔克这种电子跃迁的思想已与光谱线联系到一起了，这使玻尔大彻大悟，说："我一看到巴耳末公式，整个情形就一下子弄清楚了。"

此后，玻尔的研究工作进展十分顺利，从 1913 年 3 月到 8 月，为了解释氢原子线状光谱这一事实，玻尔把普朗克的量子论、爱因斯坦的光子说运用于卢瑟福的行星模型中，提出了核外电子分层排布的原子结构的量子化模型(图 3-22)。他以《原子结构和分子构造》为题连续写成了 3 篇论文，这就是著名的"原子论三部曲"。

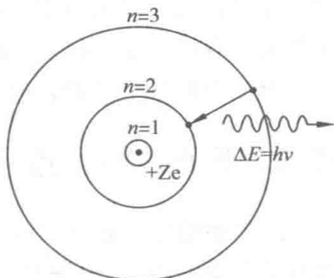


图 3-22　玻尔的原子模型

在玻尔的量子化原子结构模型中，他提出了如下基本假设：

(1)定态假设：电子只能处在一些分立的轨道上，在这些特定轨道上运行时，电子既不发射也不吸收能量，因此是稳定的(即处于“定态”)。在不同轨道上运动的电子具有不同的能量，因而能量是量子化的，轨道能量值依 $n(n=1,2,3,\cdots)$ 的增大而升高，n 称为量子数。在定态中，能量最低的状态($n=1$)称为基态，其他高能态则称为激发态。

(2)能量跃迁假设：当电子从一个高能量状态 E_j 的轨道跃迁到低能态 E_i 的轨道(其中，$i,j=1,2,3,\cdots$ 为整数)时，就要辐射出光子，光子的频率 ν 满足如下关系：$h\nu=E_j-E_i$，反过来如果电子从低能态 E_i 跃迁到高能态 E_j，那就要吸收光子。

定态假设暗含了轨道的量子化：原子的不同能量状态跟电子沿不同的圆形轨道绕核运动相对应。原子的能量是分立的、不连续的，因此电子可能轨道的分布也是分立的、不连续的。

后来，玻尔又提出了对应原理，即在原子范围内的现象与宏观范围内的现象可以各自遵循本范围内的规律，但当把微观范围内的规律延伸到经典范围时，则应该能够过渡为经典规律。

基于这些假设和对应原理，玻尔又推导出了一个角动量量子化条件，并且推导出了所有氢原子光谱的经验定律。

他的论文经卢瑟福推荐，发表在 1913 年的《哲学杂志》上。论文把卢瑟福、普朗克和爱因斯坦的思想结合起来，创造性地将光的量子理论引入原子结构理论中，克服了卢瑟福无法解释的原子稳定性的困难。9 年后，玻尔因此获得了诺贝尔物理学奖。

在玻尔的量子化模型提出后，德国物理学家、慕尼黑大学的理论物理学教授阿诺德·索末菲(1868—1951，图 3-23)受行星运动特点的启发，提出：电子绕核的运动除了圆周轨道外，还应当包含椭圆形轨道。这就是说，对于第 n 个圆周轨道而言，各种偏心率的椭圆均有可能。此外，他基于爱因斯坦的相对论考虑，认为电子的质量会随电子运动速率的变化而变化。经过这样的修正后，原来玻尔理论中氢原子的一个定态就分裂成若干能量稍有不同的定态，原来一条谱线就分裂成若干条谱线。这就是光谱线的所谓“精细结构”，同实验观测完全一致。由此，索末菲也成功地解释了重元素 X 射线谱的精细结构以及正常塞曼效应。



图 3-23　索末菲像

索末菲是20世纪最伟大的物理学家之一,也是一位出色的教师,他的《原子结构和光谱线》是一本名著,影响了好几代学习物理学的学生。量子力学的两员大将泡利和海森伯就是在索末菲的指导下获得博士学位的。在他的学生之中,有6人获得过诺贝尔奖,如德拜、海森伯、泡利和贝特等,几十人成为第一流的教授。索末菲本人获得过无数的荣誉,唯独没有获得诺贝尔奖。他曾经被数次提名诺贝尔奖,获提名次数多过任何其他物理学家。

玻尔理论的下一个重要发展,是1916年爱因斯坦基于玻尔的原子理论对物质和辐射的相互作用问题所做的研究。他以分子的吸收和发射过程为研究对象,把发射过程分为自发发射与受激发射,然后用统计方法推导出了普朗克辐射定律。如果略去受激辐射,就得到了维恩的辐射定律。爱因斯坦的这一工作,第一次提出了受激辐射理论,成为20世纪60年代蓬勃发展的激光技术的理论基础。现在谁都知道激光技术的重要性,但若真正理解激光,还得从玻尔的原子结构理论和爱因斯坦的受激辐射理论开始。

玻尔的故事

1."自己是傻瓜"

玻尔性情谦和、诚恳,很容易与人相处,并以自己的崇高威望吸引了国内外一大批杰出的物理学家,创建了哥本哈根学派,并成为哥本哈根学派的领袖。玻尔与这些物理学家不仅创建了量子力学的基础理论,给予合理的解释,使量子力学得到许多新应用,如原子辐射、化学键、晶体结构、金属态等。更难能可贵的是,玻尔与他的同事在创建与发展量子力学的同时,还创造了"哥本哈根精神"——一种独特的、浓厚的、平等自由地讨论和相互紧密地合作的学术气氛。直到今天,很多人还说"哥本哈根精神"在国际物理学界是独一无二的。曾经有人问玻尔:"你是怎么把那么多有才华的年轻人团结在你身边的?"他回答说:"因为我不怕在年轻人面前承认自己知识的不足,不怕承认自己是傻瓜。"实际上,人们对原子物理的理解,即对所谓原子系统量子理论的理解,始于20世纪初,完成于20世纪20年代,然而"从开始到结束,玻尔那种充满着高度创造性、敏锐和带有批判性的精神,始终指引着他的事业的方向,使之深入,直到最后完成。"

2.真挚的诤友——玻尔与爱因斯坦

玻尔和爱因斯坦是在1920年相识的。那一年,年轻的玻尔第一次到柏林讲学,和爱因斯坦结下了长达35年的友谊。但也就是在他们初次见面之后,两人即在认识上发生分歧,随之展开了长期的论战。他们只要见面,就会唇枪舌剑,辩论

不已。这种争论直至爱因斯坦去世。但是，长期论战丝毫不影响他们深厚的情谊，他们一直互相关心，互相尊重（图3-24）。


图 3-24　玻尔（左）和爱因斯坦（右）

爱因斯坦本来早该获得诺贝尔奖，但由于当时有不少人对相对论持有偏见，直到1922年授予他1921年度诺贝尔物理学奖，并决定把1922年度的诺贝尔物理学奖授予玻尔。这两项决定破例同时公布。爱因斯坦当时正在赴日本的途中，在途经中国上海时接到了授奖通知。而玻尔曾对爱因斯坦长期未能获得诺贝尔奖深感不安，怕自己在爱因斯坦之前获奖。因此，当玻尔得知这一消息后非常高兴，立即写信给旅途中的爱因斯坦。玻尔非常谦虚，他在信中表示，自己之所以能取得一些成绩，是因为爱因斯坦做出了奠基性的贡献。因此，爱因斯坦能在他之前获得诺贝尔奖，他觉得这是“莫大的幸福”。爱因斯坦在接到玻尔的信后，当即回了信。信中说：“我在日本启程之前不久收到了您热情的来信。我可以毫不夸张地说，它像诺贝尔奖一样，使我感到快乐。您担心在我之前获得这项奖金。您的这种担心我觉得特别可爱——它显示了玻尔的本色。”

3. 玻尔与费曼

当美国物理学家费曼（1918—1988，图3-25）还在美国洛斯阿拉莫斯实验室参与原子弹研制的工作时，职位很低。第二次世界大战期间，这个实验室研究设计并制造了原子弹，有不少重要的物理学家在这里工作。一天，玻尔与他的两个儿子（当时他们的化名分别叫尼古拉·贝克和吉姆·贝克）都来到洛斯阿拉莫斯。该实验室的领导们都把玻尔看成“神”，每个人都想一睹玻尔的风采。由于每次会议上参会的人很多，年轻的费曼坐在一个角落，只能从前面两个人的脑袋之间看到玻尔。


图 3-25　费曼像

在举行下一次会议的那天早晨，费曼接到一个电话，是玻尔的儿子吉姆·贝克打来的，玻尔父子要与费曼谈谈。费曼有些惊讶，他觉得自己只是个“打工的”。8点钟，费曼与玻尔父子在办公室见了面。当玻尔提出一些想法后，费曼就毫不客气地说不行。接着，他们又讨论了其他想法，讨论大约持续了两个小时，玻尔的烟斗也一直在一闪一闪的。然后玻尔说：“我们应该把各位领导叫来开会吧！”

吉姆·贝克对费曼说：上一次开会时，玻尔要我们记住你这个坐在后面的小

伙子。玻尔说，“他是这里唯一不怕我的人，他才敢说出我的想法疯了。”玻尔对儿子说：“下次我们讨论时，不要与那些只会说‘是的，玻尔先生，这一切都行得通’的人讨论。把那个小家伙叫来，我们先跟他讨论。”费曼这才恍然大悟，明白了为什么玻尔要单独与他谈话。

4. **藏起来的奖章**

玻尔在1913年创立了新的原子结构模型，并荣获1922年度的诺贝尔物理学奖。1943年秋天，德国法西斯入侵丹麦，并且扬言要抓玻尔。玻尔只得逃往国外，整理行装时，他从箱子中发现了诺贝尔金质奖章。他犹豫了一番，带走怕在路上丢失，留下又怕落入法西斯分子手中。最后，玻尔把心爱的奖章放入一瓶王水中，把奖章溶解于王水中。第二次世界大战结束后，玻尔回到家中，发现那瓶王水还在原处。于是他叫人把黄金从王水中提取出来，又做成一枚与原奖章一样的诺贝尔金质奖章。

化学元素周期表中的“量子”奥妙

原子结构理论的最大功绩，在于它有效地解释了化学元素周期表的意义。

1869年，俄罗斯的著名科学家德米特里·伊万诺维奇·门捷列夫(1834—1907，图3-26)提出了按原子量的次序排列起来的能够反映元素性质的化学元素周期表。在所有元素中，有共同性质的每一族元素被划入周期表中竖直的一栏，表中的八栏或八族显示了这些化学元素有规律的重复模式。那时共有62种元素，按其性质排列时出现了一些空位。后来，在周期表的指引下，先后发现了一些新的元素，如钪(Sc)、锗(Ge)、镓(Ga)等，补足了这些空位。但是，为什么元素排列会有周期性？此后的五十余年中一直没有得到合理的解释。



图3-26　门捷列夫在研究元素之间的关系

尼尔斯·玻尔在建立了原子结构的量子理论之后，开始着手对于化学元素周期表给出一个物理上的解释，他的原子的量子化结构为周期表中出现的独立重复结构提供了线索。根据周期性的经验规律以及光谱性质，玻尔假定，原子可以认为是电子被逐个俘获并被束缚而建立起来的。他认识到，当原子处于基态时，不是所有的电子都能处于最内层的轨道。他考虑了氦原子最内层轨道的“填满”问题，并认为与氦原子光谱中存在两套互无联系的光谱的奇怪现象有着本质的联系。为什么在每一轨道上只能存在有限个电子？玻尔猜测说：“只有当电子相互

和睦时，才可能接受具有相同量子数的电子”，否则就“厌恶接受”。

玻尔的博士后研究生、年轻的奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利(1900—1958，图 3-27)不喜欢这种牵强附会的解释。经过了 4 年的思考之后，他找到了隐藏在这种规律性背后的一个重要原理——泡利不相容原理。这个原理指出：在一个原子中，不可能有两个电子处在完全相同的运动状态；换言之，两个电子各自的 4 个量子数 n、l、m、s 不可能取完全相同的值。泡利不相容原理简单的表述就是，两个电子不能同时占据同样的状态；或者说，在每一个确定的电子能态(即 4 个量子数组合)上，最多只能容纳一个电子，就像一个国家中不能同时有两个人是最高领导人一样。


图 3-27　玻尔与泡利在一起研究

在这 4 个量子数中，n 来自于玻尔，对应于第 n 个圆周轨道(或称为第 n 个“壳层”)，称为主量子数。与之相应，可以把电子看成分布在一些“壳层”上，每一壳层对应一个特殊值 $n(n=1,2,3,4,\cdots)$ 的壳层，分别称为 K 壳层、L 壳层、M 壳层、N 壳层…

l 是 1915 年索末菲在玻尔的量子数 n 的基础上引进的另一个量子数，称为角量子数，在物理上对应于在第 n 个圆周轨道(即第 n 个壳层)上各种偏心率的椭圆运动的角动量。

第 3 个量子数 m 称为磁量子数，是根据线状光谱在磁场中还能发生分裂从而显示出微小能量差别的现象而提出的。磁量子数描述了原子轨道在空间的伸展方向。

第 4 个量子数 s 称为自旋量子数，规定了电子围绕自身转轴的自旋。电子的自旋是在泡利不相容原理提出的同年由荷兰物理学家乌伦贝克和古德斯密特提出的，自旋方向有两种可能。

泡利不相容原理实际上解决了这样一个问题：为什么原子里的多个电子不能共同处在能量最低的基态中？按照泡利不相容原理，n 分别取 1，2，3，4 值时，对应壳层中的电子最多有 2 个、8 个、18 个和 32 个，因此基态只能被先被原子核俘获的两个电子占据，后被俘获的电子只能顺次占据高能态的壳层；当第 2 壳层有了 8 个电子之后，再后来被俘获的电子就只能占据第 3 壳层(最多 18 个)……这实质上是原子体系稳定性的表现。

这导致了两个结果：一是化学元素周期表中每一周期最后一个元素最外层的

电子数,除了氦以外都是 8 个。二是除了这个例外,其他每一栏中各个原子最外层的电子数目都是相同的。这就解释了为什么同族中的原子会有相似的化学性质及价电子的问题。也就是说,原子的化学性质取决于最外层的电子。因此,化学元素的周期性反映了原子量子层的循环对称性。

“上帝的鞭子”——泡利

泡利(1900—1958,图 3-28)出生于奥地利的维也纳,父亲是一个内科医生,后来成为维也纳大学的生物化学教授,教父则是大名鼎鼎的物理学家马赫。这样的家庭背景使他从小就受到了科学的熏陶,在中学时就自修了大学物理学。1918 年中学毕业后,18 岁的泡利带着父亲的介绍信,来到慕尼黑大学,找到了著名物理学家索末菲,要求不上大学而直接做他的研究生。索末菲说可以去听他的课,但未必能听得懂,但泡利不仅说能听懂,而且要求参加他的讨论班。在讨论班上,索末菲发现,泡利是掌握问题最快、理解问题最深的一个,于是,泡利就成了慕尼黑大学最年轻的研究生。



图 3-28 泡利像

1921 年,泡利因对氢分子模型的研究而获得了博士学位。同年,他为德国的《数学科学百科全书》写了一篇长达 237 页的关于狭义相对论和广义相对论的词条,成为该领域的经典文献之一。爱因斯坦读后做了极高的评价,他写道:“将读这本成熟的、思想周密的著作的人,恐怕未必会相信它的作者仅仅只有二十一岁。对思想发展过程的深入的心理学解释,数学推导的完美无缺,对现象的物理本质的深刻了解,明晰而又系统地描述主题的能力,学问渊博,论述完备,满有信心的批评,不知还有什么会比这一切更令人感到惊讶的了。”

泡利具有天才的洞察力,泡利不相容原理就是他从浩如烟海的光谱数据中得出的,其难度据认为远远超过了当年开普勒整理行星轨道数据时的难度。

泡利最重要的发现是泡利不相容原理和中微子。除此之外,传说还存在着一种神秘的“泡利效应”:只要泡利一踏进实验室的门槛,准会有一些东西被毁坏。

哥廷根大学的实验物理学家弗兰克(1925 年诺贝尔物理学奖得主,以弗兰克-赫兹实验而著名)起初不相信泡利效应,但有一天下午,他的实验室中一台仪器莫名其妙地崩溃了,泡利此时不在现场。所以,幽默的弗兰克便写信给泡利,很欣慰地告诉他说你总算无辜了一回。不料几天后,弗兰克收到了泡利从丹麦发来

的回信，他很诚实地"自首"说，他正在玻尔处访问，事发当时他乘坐的火车正好有几分钟停靠在哥廷根的站台上！据说，弗兰克在总结实验失败的原因时，一本正经地加了一个备注——"泡利经过此地"。

由于泡利头脑敏锐、语言犀利，批评别人时一针见血，具有一眼就能发现错误的能力，玻尔称泡利为"物理学的良心"，而玻尔的好友、奥地利物理学家保罗·爱伦菲斯特则称泡利为"上帝的鞭子"。因此，物理学界笑谈，"泡利效应"还有更为广泛的含义：泡利出现在哪里，那里的人不管是在做实验操作还是进行理论推导，都会出岔子。

在泡利晚年，有一天，他参加了年轻的物理学家杨振宁宣讲他与米尔斯的规范场论的报告会。正当杨振宁刚刚写出他的方程时，泡利突然问了一句："质量呢?!"这正好击中了杨振宁理论的要害，杨振宁自己也深知这一点，于是他讲不下去了，在讲台上愣了好大一会儿，还是主持报告会的主持人圆了场，对泡利说："泡利教授，还是让年轻人讲完吧。"

杨振宁理论的疑难后来被英国物理学家、出生于 1929 年的彼得·希格斯解决了，后者提出了希格斯机制，预言存在一种希格斯粒子——后来被称为"上帝粒子"，希格斯因此获得了 2013 年度的诺贝尔物理学奖。

泡利晚年非常关心微观物理学中的一个"精细结构常数"，其数值等于$\frac{1}{137}$。它最初出现在光谱理论中，后来广泛地出现在粒子物理中。他一直试图找到一个理论，希望能够从中自然地得出这个数值，但一直没能成功。对泡利而言，对数字 137 的解释是场论能否成功的试金石。在泡利弥留之际，后来成为《泡利物理学讲义》英译本编者的查理·P. 安兹去医院看望泡利，泡利问安兹，是否已经注意到他房间的号码：137！几天之后，泡利就在这个房间与世长辞了。

三、量子力学的建立



量子力学的发展:殊途同归

玻尔的原子理论尽管取得了一定程度的成功,但它毕竟只是对氢原子而言才算精准的,对于多电子原子,甚至比氢原子稍稍复杂一点儿的氦原子,其光谱结构也得不到令人满意的说明。而且,由于其理论半经典、半量子的性质而存在着难以解决的内在矛盾:为什么在氢原子中核与电子之间的静电相互作用有效,而加速电子在定态时发射电磁辐射的能力却消失了? 此外,定态之间的发射和吸收辐射的原因也是不清楚的,正如卢瑟福的批评:"当电子从一个能态跳到另一能态时,必须假设电子事先就知道它要往哪里跳!"所以,到了 20 世纪 20 年代,这个犹抱琵琶半遮面的理论便被一个新的也更彻底的量子理论取而代之,成为原子结构研究的标准理论。这就是量子力学,它给出的原子结构是一个以原子核为中心的电子云图景。当然,量子力学并不仅仅适用于原子体系,后来的发展表明,它是主宰微观世界的基本规律。

量子力学经历了不同的发展道路:一是以德布罗意为起点、以薛定谔为主将的波动力学之路;一是以玻尔为灵魂,以海森伯、玻恩、泡利、狄拉克为干将的矩阵力学之路,但殊途同归,最终成就了量子力学。

量子力学的创建者们是生活浪漫的一群:他们智力超群、个性独具、无拘无束,从事着一种极具冒险精神的智力探险游戏;他们常常是在家庭聚会中、在咖啡馆里、在旅途的火车中、在散步的森林里、在夜晚的篝火旁、在爬山的进程中、在讨论班的辩论中……交流、分享和竞争着彼此的思想,创造性的思想火花也常常在不经意间产生;他们在咖啡馆里争论时在桌面上写下的公式甚至被咖啡馆老板小心翼翼地保留着,以备他们第二天继续讨论……他们就像金庸小说中的武林高手一样行走于学术的江湖,他们走到哪里,哪里就是交锋、论道的战场,时时、处处都在进行着思想英雄之间的较量!

德布罗意的物质波理论


图 3-29　康普顿像

现代科学的发展常常是由很多人一点一滴、集腋成裘式地建构起来的。20 世纪 20 年代，远在科学中心的美国，一位毕业于普林斯顿大学、曾受 J.J. 汤姆孙和卢瑟福指导、以访问学者的身份在卡文迪许实验室工作过、后任芝加哥大学教授的美国物理学家——康普顿（1892—1962，图 3-29），就是一个现代物理学发展洪流中的贡献者。他在 1923 年做了一个 X 射线通过晶体时的散射实验，发现了康普顿效应，这一效应明确地证明了爱因斯坦光的波粒二象性理论。他因此于 4 年后获得了诺贝尔物理学奖。

正当很多物理学家为光的这一特性而困惑不解的时候，一位受 20 世纪初物理学蓬勃发展的影响而从历史学转向物理学研究的法国青年——路易 · 维克多 · 德布罗意（1892—1987），把波粒二象性的思想推广到了所有的物质粒子。德布罗意提出，不仅光具有波粒二象性，一切实物粒子（如电子、原子、分子等）也都具有波粒二象性；动量为 p 和能量为 E 的实物粒子相当于频率为 ν 和波长为 λ 的波，二者之间的关系如同光子和光波的关系一样。人们把这种波称为"物质波"或"德布罗意波"（图 3-30）。德布罗意以此为基础，对玻尔的原子理论给出了一个新的解释。他认为，在原子中，电子的轨道并不是正圆的，而好像是一种波动的样子：电子在原子中以驻波的形式存在。这样，德布罗意把驻波与玻尔的定态相联系后发现，由驻波条件完全可以推出玻尔的量子化条件，二者是等效的！

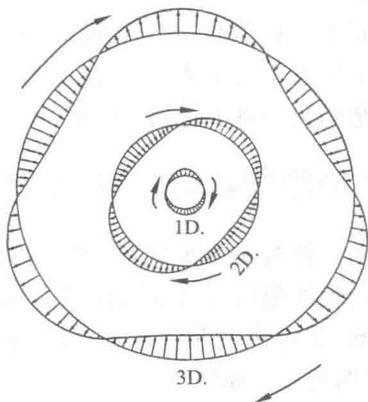


图 3-30　原子中电子的轨道图像：驻波

德布罗意的文章发表于 1923 年的《法国科学院通报》上。1924 年，德布罗意又在向巴黎大学提交的博士论文《量子理论的研究》中完善了物质波理论。

当时考试委员会主任问他，怎样才能观察到电子波呢？德布罗意马上就答道："当电子通过一个小孔时就可产生波动现象"。果然，在 1925 年，美国物理学家戴维孙（1881—1958）和革末最早从实验中拍到了电子的波动图像，不过他们还不知道是怎么回事。1926 年，戴维孙去英国探亲，并随身带着图片，顺便参加了在牛津举办的一个会议。在会上，大家看了这些图片，玻恩认为，这就是电子波动

的图像。会后，乔治·汤姆孙（1892—1975，J. J. 汤姆孙的儿子）也进行了电子波的实验，并得到了电子波的图像。这样，人们就接受了物质波的观念。后来，德布罗意获得了1929年的诺贝尔物理学奖。

戴维孙的家很穷，他依靠自己的努力和利用业余时间刻苦学习才完成了学业，由于成绩优秀，受到密立根的器重，并被密立根推荐去读研究生。第一次世界大战期间，他到了一家电信公司工作。他和革末（图3-31）合作进行电子发射方面的研究时，几经曲折，验证了电子的波动性质。


图3-31　美国物理学家戴维孙（左）和革末（右）

乔治·汤姆孙先是学的数学，后来在父亲的指导下研究物理。1927年，他设计并进行了电子衍射实验，结果严格服从德布罗意关系式。为此他与戴维孙一起获得了1937年度诺贝尔物理学奖。有趣的是，汤姆孙父子两代都因电子而获得了诺贝尔奖：老汤姆孙因为电子的发现并证明其为粒子而获奖，小汤姆孙则因为完善了电子的观点、证明电子具有波动性而获奖，“老子英雄儿好汉”的说法在他们父子身上得到了体现。

“贵族”科学家德布罗意

路易·德布罗意（图3-32）是一个传奇，他的人生轨迹就像他所提出的波粒二象性一样，发生过本质上的转型，并且转型非常成功。在他身上，我们见证了什么是“时势造英雄”。

德布罗意是法国外交和政治世家德布罗意公爵家族的后代，由于波粒二象性的发现，他为这个已经闻名了几个世纪的家族增添了新的光彩。1960年他的哥哥莫里斯·德布罗意去世后，路易继承了他哥哥的头衔，成为法国公爵和德国亲王。


图3-32　路易·德布罗意像

早年，在巴黎詹森公立中学毕业后，德布罗意进入了巴黎大学，攻读理论物理学，但按其家族传统，长大后要从事外交活动，所以他同时兼修了历史，并于1910年获得了历史学学位。1911年，第一届索尔维会议在比利时布鲁塞尔召开，会议主题是辐射与量子论，他的哥哥莫里斯担任会议的秘

书，负责整理文件，这使路易了解到很多量子理论的内容尤其是普朗克和爱因斯坦的工作，激起了强烈的兴趣。他为20世纪初物理学翻天覆地的革命性变化所鼓舞，下定决心转向理论物理学的学习。

通过努力，德布罗意终于在1913年获得了巴黎科学学院的理学士学位。他说："是哲学、归纳法和H.彭加勒的著作"把他引向了科学。第一次世界大战期间，德布罗意在法国工兵中服役6年，在埃菲尔铁塔的无线电台工作，因此熟知无线电波的知识。他的哥哥是X射线专家，拥有设备精良的私人实验室，1919年，他来到哥哥的实验室，开始研究X射线；1920年，德布罗意跟随法国著名物理学家朗之万(1872—1946)攻读物理学博士学位。

德布罗意为何能够提出波粒二象性的理论？

首要的原因是"问题意识"：哥哥莫里斯与另一位X射线专家、现代固体物理学的奠基人亨利·布拉格(1862—1942)联系密切，后者曾主张X射线的粒子性，并对莫里斯产生了很大影响，他因而经常与弟弟路易讨论波与粒子的关系问题——是波，还是粒子？这是个问题，德布罗意兄弟俩为这个问题而纠结。

二是对法国物理学家路易·马赛尔·布里渊(1854—1948)理论的借鉴。布里渊在1919年至1922年间连续发表了一系列论文，认为电子的运动会在原子核周围的以太中激发出一种波，并在电子的轨道半径适当时通过波的干涉而形成环绕原子核的驻波，以此来解释玻尔的定态轨道原子模型。

三是受爱因斯坦光的波粒二象性观念的启发。

幸运的是，在德布罗意的博士论文面临被否决的形势下，导师朗之万写信向爱因斯坦求助。爱因斯坦马上看到了德布罗意理论的重大意义，复信给朗之万，称赞德布罗意"已揭开了巨大帷幕的一角"。有了爱因斯坦这一封信，1924年11月，德布罗意顺利通过了博士论文答辩。

把波粒二象性的观念由光扩展到运动粒子，这个大胆的推进使爱因斯坦非常高兴，他在一篇量子统计的论文中高度评价了德布罗意的工作："一个物质粒子或物质粒子系可以怎样用一个波场相对应，德布罗意先生已在一篇很值得注意的论文中指出了。"由此，德布罗意的理论引起了广泛的关注。

一年多以后，德布罗意的理论被奥地利物理学家埃尔温·薛定谔(1887—1961)发展，从而获得了更加坚固的地位，并为他赢得了1929年度的诺贝尔物理学奖。

1951年以后，德布罗意致力于"双重解理论"，试图在经典的时空概念基础上对波动力学做出解释，未获得成功。此外，他对哲学问题极感兴趣，写过把理论物理学、科学史和哲学相结合的文章。

德布罗意终身未婚，也不愿意过贵族生活，所以卖掉了世袭豪宅。他性情和善，喜欢徒步旅行，活到了95岁高龄。

波动力学的创始人薛定谔

德布罗意的思想是革命性的，但他未能跟紧由他自己发动的革命，下一步的发展是由大器晚成的奥地利物理学家埃尔温·薛定谔(1887—1961，图3-33)做出的。



图3-33 薛定谔像

1921年起，薛定谔受聘于瑞士苏黎世大学，担任理论物理学教授，主要研究热力学和统计力学。而位于同一城市的苏黎世联邦工业大学实验物理学教授和物理研究所所长、著名物理学家彼得·德拜(1884—1966)主持着两校联合的定期物理学讨论班。在1925年11月的一次讨论会上，德拜把刚收到的德布罗意的博士论文交给了薛定谔，要求他在下一次会议上就德布罗意的理论做一个报告。报告如期举行，德拜评论说，德布罗意的思想还不成熟，因为既然粒子是一种波，就应该有一个波动方程。

几个星期之后，薛定谔做了第二次报告，他开头就说："我的同事德拜提出说应当要有一个波动方程；好的，我已经找到了。"这就是大名鼎鼎的薛定谔方程。

其实，在德拜提议之前，薛定谔就已经进行这方面的探索了。他从爱因斯坦的一篇论文的注脚中了解到德布罗意的理论后，被德布罗意描绘的氢原子稳定轨道的周长正好容纳整数个相位波从而形成驻波的图景深深地吸引了，立刻想到可以用这种概念来修正玻尔的原子模型。德拜的提议使他猛醒，让他从轨道的几何构造的思考转向了对波动传播方程的寻求上去。

几经周折和失败之后，在1925年圣诞节期间，薛定谔的研究取得了突破，他从经典力学、几何光学和波动光学的类比中找到了他的波动力学方程。

但是，这个方程有什么用？在经过了几天的迷惘之后，薛定谔终于发现了有价值的东西：从他的方程出发可以得出玻尔的氢原子理论！薛定谔认为，玻尔的量子条件具有非常奇怪的和不可理解的性质，应该被波动方程的本征值模式取代，本征值模式对应于一组分立的本征频率，整数性是这一方法的自然结果，而不是人为规定的。他用这一方程成功地解决了氢原子的能级问题，计算结果与实验数据非常吻合。

1926年1月到6月间，他以《作为本征值问题的量子化》为题，连续发表了4

篇论文，系统地阐明了波动力学理论，宣告了波动力学的诞生。1933 年，薛定谔与英国物理学家狄拉克一起，获得了该年度的诺贝尔物理学奖。

薛定谔(图 3-34)是一个兴趣广泛的人，中学时代喜欢数学和物理，但也同样喜欢文学以及古老语法中严谨的逻辑，进而喜欢上了希腊语和拉丁语，由此喜欢上了古希腊文化尤其是古希腊哲学。1906 年，薛定谔以优异成绩进入了维也纳大学，主修物理和数学。在薛定谔刚刚进入大学时，正逢维也纳大学、也是奥地利最杰出的物理学家玻尔兹曼去世，整个校园弥漫着悲痛的气氛，这深刻地影响了薛定谔，不仅使他以玻尔兹曼为榜样，而且也使他了解到玻尔兹曼所建立的以统计物理来建构宏观物理学规律的维也纳大学的物理学传统。他全力以赴地投入到了课程的学习之中，除了少量的化学、天文学和气象学课程之外，他集中选修了数学、物理课程，包括微积分、微分方程、概率论、数理统计、数论、群论、高等代数、微分几何等十几门数学课程和几乎全部物理学课程，为他后来的物理学研究打下了坚实的数理基础。薛定谔回忆说，“玻尔兹曼的思想路线可以称为我在科学上的第一次热恋，没有什么别的东西曾如此使我狂喜，也不会再有什么能使我这样。”



图 3-34　波动力学阵营中的主要代表人物：爱因斯坦、德布罗意、薛定谔

在维也纳大学，继承了玻尔兹曼学术传统和教学风格的哈森诺尔(1874—1915)以愉快、幽默的教学风格对薛定谔产生了很大的影响。大学期间，薛定谔研究了连续介质物理学中的本征值问题，为日后创建波动力学的原子图景奠定了基础。1910 年，在获得博士学位以后，薛定谔留校从事实验物理学的教学与研究工作。第一次世界大战期间，薛定谔作为一名炮兵军官服役，闲暇时间研究理论物理。他幸存了下来，但他的导师哈森诺尔却在战争中永远地倒下了。战争使奥匈帝国土崩瓦解，也使薛定谔的生活处于艰难之中。幸好，从 1921 年起，薛定谔受聘于瑞士苏黎世大学。苏黎世依山傍水、风景秀丽、气候宜人，薛定谔经常进行郊游，边旅游边讨论问题。这种由薛定谔夫人安排的小旅游“总是以到了一个可爱的小客栈和一两瓶葡萄酒而结束。”

除了波动力学，薛定谔后来的工作中比较著名的还有提出"薛定谔猫"悖论，出版《生命是什么》、哲学自述《我的世界观》等著作。

矩阵力学的创始人海森伯

除了德布罗意与薛定谔的波动力学路径之外，对玻尔原子理论的改进也在另外一个方向上进行着，在这个路径中，年轻的德国物理学家海森伯(1901—1976，图 3-35、图 3-36)以其矩阵力学首先做出了最重要的突破。


图 3-35　海森伯像


图 3-36　1937 年的海森伯和夫人伊丽莎白

海森伯天赋极高，而且善于学习；不仅学习别人的思想成果，而且更加关注其认识论观点和思考问题的方法。爱因斯坦在相对论中抛弃绝对速度、绝对同时性等概念所蕴含的方法论原则——不可观察的概念是没有意义的——给了海森伯以极大的启示。

1925 年初夏，海森伯犯病，一种名叫"枯草热"的花粉过敏症折磨着他。整个脸都肿了起来，为此他到北海的一座荒岛上去休养。由于要思考量子的问题，他很紧张，以致难以入眠，空闲时多去爬山或吟诵歌德的诗句。在休养中，他将模糊的想法都澄清了。他认识到，在玻尔的原子结构理论中，"轨道"之类的概念就属于不可观察的概念。所以，他决定放弃电子轨道的物理图景，"只靠那些原则上可观察的量之间的关系，建立理论量子力学的基础。"

之后，根据对应原理，海森伯把一些物理量改造成了可观察量，得到了一个连他自己都困惑的结果：物理量的乘积运算不可交换！

海森伯就自己的想法与另一位年轻的物理学家泡利交换意见，得到了泡利的极大鼓励。又过了十几天，海森伯将论文完成，交给老师麦克斯·玻恩(1882—1970)，玻恩将这篇论文交给了《物理学报》，同时想在数学上进一步论证它。大约

在此时，他碰到了一个数学学得很好的学生，名叫约尔丹(1902—1980)。玻恩与约尔丹合作完成了数学上的完善工作，并发表了第2篇论文。接着海森伯、玻恩和约尔丹又合作完成了第3篇论文，这篇论文包含了量子力学几乎所有的观点。这样，这3篇论文的完成标志着量子力学体系的建立。由于在文章中引入了一种新的数学工具——矩阵代数，于是便将新的理论命名为“矩阵力学”。

海森伯的故事

1. 海森伯与诺贝尔奖

由于海森伯在“创立量子力学”上的贡献，1933年11月3日，德国物理学会授予海森伯马克斯·普朗克奖章。这是德国物理学家在国内所能获得的最高荣誉。6天之后，海森伯又收到瑞典皇家科学院的电报，诺贝尔评奖委员会决定将头一年(即1932年)诺贝尔物理学奖授予他。一个月后，海森伯同母亲一起到瑞典首都斯德哥尔摩，从瑞典国王的手中接受了诺贝尔奖。在那里，海森伯见到了狄拉克和薛定谔，他们也来共同领取当年(1933年)的诺贝尔物理学奖。

事后，海森伯写信给玻尔(图3-37)，他在信中说，“关于诺贝尔奖，我觉得很对不起薛定谔、狄拉克和玻恩。”海森伯认为，1932年的诺贝尔奖应该与他的老师玻恩一起分享。薛定谔和狄拉克则不应该分享诺贝尔奖，“他们都配得上得一个完整的奖”。



图3-37　玻尔（右）和海森伯（左）在一起

2. 海森伯拒绝出走

1939年夏天，海森伯到美国讲学时，已经出走到美国的物理学家费米(1901—1954)和古德斯密特(1902—1978)问他：为什么不到美国来呢？海森伯回答说：“不，我不能，因为德国需要我。”虽然德国纳粹的政策使民众吃了苦头，痛苦不堪，海森伯依然拒绝了许多邀请。

德国战败后，海森伯被拘押。碰巧，负责审讯的是古德斯密特。这时，古德斯密特问海森伯，现在愿不愿意到美国来工作呢？海森伯仍然拒绝。其实，海森伯并非只考虑政治原因，也不仅仅是出于爱德国。在玻恩流亡英国后，海森伯曾给他写信说，自己之所以拒绝国外那么多诱人的邀请，是因为“我们是为世人托付给我们的科学而活着”。

随机性的世界图景

有趣的是，由于薛定谔与海森伯研究的出发点不同，并通过不同的思维过程，分别得到了不同的数学形式：波动方程和矩阵方程。因此，人们对此产生了不同的看法，并发生了论争。由于大家对矩阵不熟悉，而对波动理论很熟悉，许多人自然就倾向于波动力学。不过，这时年轻的英国科学家狄拉克(1902—1984)出来说话了，他从数学上证明，波动力学与矩阵力学是彼此等价的，即便是波动力学中也仍包含了薛定谔所讨厌的跃迁思想，以至于后来薛定谔竟说道："我不喜欢它(指跃迁)，我真希望我不曾做过与之有关的任何事情。"由于波动力学与矩阵力学只是形式上的不同，本质还都是一样的，后来就将二者统一称为量子力学。

量子力学是建成了，然而，如何理解它的物理意义，尤其是薛定谔波动方程中波函数的意义问题，困扰了包括薛定谔本人在内的几乎所有物理学家。这时，海森伯的老师玻恩给出了一个震惊世界的解释：波函数本身没有意义，它的意义由其平方确定的值给出，代表了某时刻在空间某点处找到粒子的几率。几率是一个数学的概念，也称为概率，是对随机性(也就是偶然性)问题的一种描述方式。这样，在量子力学中，原子的结构变成了这样一种随机性的几率图景：在原子中我们无法确定电子在原子核周围的确切位置，只能给出它在某一位置时的几率。

玻恩(图 3-38)最初是学天文学的，后来改学物理学，是最早接受相对论的科学家之一。他与爱因斯坦保持了终生的友谊，但在量子力学问题上，二人各自保持着不同的观点，并一直为此而争论。直到今天，玻恩在量子力学中的解释仍是"正统的"。他的这些研究使他获得了1954 年诺贝尔物理学奖。



图 3-38　玻恩像

至此，我们看到，与宏观世界所遵从的经典物理学不同，关于微观世界的探索，存在着几大重要特征：

首先，微观对象的(理论)规律的基本特征是，从理论建构到实验验证，主要以光的发射或吸收过程的基本事实(尤其是光谱学事实)为依据，形成了以量子力学为核心的理论体系。

其次，微观对象的基本特征是，物理量(如坐标、能量、动量、角动量、自旋等)取值的不连续性，粒子运动的随机性、不确定性，以及形形色色的对称性。

第三，应用广泛，影响深刻。量子力学对于原子、亚原子世界的理解，从根本上改变了人类对于物质世界的认识，进而以其对半导体、微晶片、超导材料、纳米材料、核能、激光技术、DNA 等等的理解而成为当代计算机技术、信息技术、能源

技术、材料科学和生物技术等广泛领域的重要理论基础。因此,量子力学不仅成为其他科学技术领域的理论基础与方法楷模,甚至也深刻地影响了人类的哲学思想,使物理学步入了对其他科学技术领域、社会生活领域乃至现代文明最具影响力的时代。正因为如此,物理学获得了一个崇高的名声:20 世纪是物理学的世纪(图 3-39)。

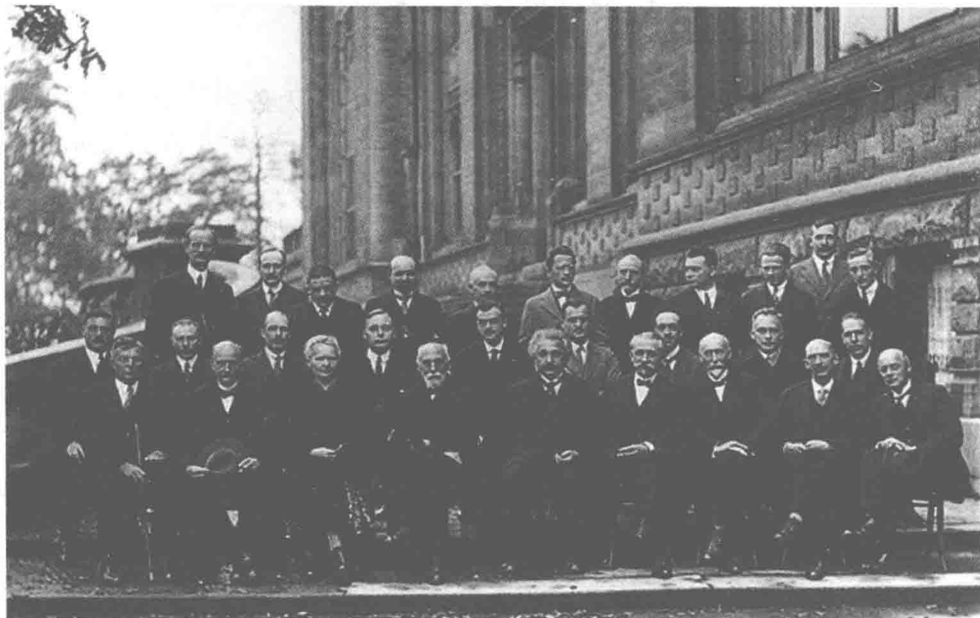


图 3-39 1927 年第五届索尔维会议合影——全世界天才最集中的照片

图中,后排左起:A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger(薛定谔), E. Verschaffelt, W. Pauli(泡利), W. Heisenberg(海森伯), R. H. Fowler, L. Brillouin。

中排左起:P. Debye(德拜), M. Knudsen, W. L. Bragg(布拉格), H. A. Kramers, P. A. M. Dirac(狄拉克), A. H. Compton(康普顿), L. de Broglie(德布罗意), M. Born(玻恩), N. Bohr(玻尔)。

前排左起:I. Langmuir, M. Planck(普朗克), M. Curie(居里夫人), H. A. Lorentz(洛伦兹), A. Einstein(爱因斯坦), P. Langevin(朗之万), Ch. E. Guye, C. T. R. Wilson(威耳孙), O. W. Richardson。

四、粒子物理学



关于粒子物理的研究，有一个基本的特征：小对象、大科学。也就是说，与以往可以由几个人甚至一个人完成的理论研究或实验研究、称为“小科学”的时代不同，微观世界的研究者大多不是孤军奋战，而是需要广泛的交流与协作，吸引了众多人类最优秀的头脑参与其中，可以说是群星灿烂；而且，所需的实验设备常常是投入巨大，运行经费高昂，研究过程费时、费力，需要众多参与者的合作，科学研究进入了所谓的“大科学”时代。

概要地说，各种各样的原子仅由3种粒子构成：电子、质子和中子，而质子和中子则由夸克构成。问题是，这些亚原子粒子之间的相互作用以及它们的运动规律非常复杂，使得微观世界的粒子发现接踵而至、理论图景异彩纷呈，大有让人应接不暇之感。

宇宙射线的发现

1903年，卢瑟福和他的助手对空气中的电离现象进行研究。当他们把所有的射线源都小心地挪开后，发现验电器仍能测到空间的离子对。后来他们干脆用铅板把验电器罩起来，虽然离子对少了许多，但是还未完全消除。为此，他们猜想，是不是在空中存在某种贯穿能力很强的射线，连铅板都挡不住它们呢？为了弄清这其中的奥妙，有人将一个很灵敏的验电器放在巴黎300 m高的埃菲尔铁塔顶上测量，发现比起地面离子对有所减少。这到底是怎么回事呢？这就要到高空去检测了。这激起了一位奥地利青年的好奇，他要到高空去看个究竟。

赫斯(1883—1964)出生在奥地利格拉茨附近的沃尔德斯坦，1906年考入格拉茨大学，毕业后到维也纳大学的镭学研究所工作，并在此工作了10年。赫斯不仅是一位物理学家，还是一位气球飞行爱好者。他刚到镭学研究所时，发现有人注意到空气中的电离现象。这自然也引起了赫斯的注意。在航空俱乐部的协助下，赫斯制作了10个气球。每个气球都可以悬挂一个装置，其中可放置两三台仪器。1911年，赫斯开始实验研究空气中的电离现象。他注意到，无论是白天还是黑夜，他的测量结果都是一样的。显然这与太阳辐射无关。

赫斯的成功确定了外空间辐射的存在，开辟了一个广阔的研究领域。另外，赫斯的行动也激励许多科学家投身到宇宙辐射的研究中去。

1911 年，当赫斯的第一个气球升到 1 070 m 时，辐射强度和电离程度与地面上的测量差不多。1912 年，他的气球升到了 5 350 m。从全程测量来看，在最初的上升过程中，电离程度有所下降，到 800 m 的空中时略有上升；升到 1 400 至 2 500 m时，其强度明显高于地面的测量值；到 5 000 m 时，强度已高出地面的几倍。一位科学家将气球升到 9 000 m 时，测到的辐射强度为地面值的 50 倍。这证实了赫斯的猜想——随高度增加，辐射也增加。

由于赫斯的开创性研究，人们最初将这种辐射称为"赫斯辐射"，后来美国物理学家密立根为天空的辐射起了一个名字——"宇宙射线"，今天也简称为"宇宙线"。有趣的是，他认为，宇宙线发源于宇宙的边缘，在这里上帝不停地制造物质，宇宙线是物质"出生时的啼哭"。密立根的解释不足信，但他对于宇宙线的研究是充满热情的。他将仪器安装在气球上或飞机上进行测量，同时也将仪器沉入湖底去测量。

赫斯的发现很重要，人们从宇宙线获得了许多天体物理学的研究材料，对宇宙演化的历史也有了很深入的了解。在粒子物理学的早期研究中，宇宙线发挥了重要的作用。

宇宙线的研究还使人类对生存环境有了更深的认识，尤其对长时间停留在外层空间的宇航员就更有意义了；同时，宇航员在外层空间的活动中，宇宙线研究也成为他们的研究项目之一。

质子与中子的发现

早在 1919 年，卢瑟福用 α 粒子的散射来研究原子核的过程中就第一次实现了人工核衰变(图 3-40)。他在利用镭放射出的 α 粒子轰击氮原子核时，发现了一种新的粒子，它的质量非常小，经研究这是氢的原子核。卢瑟福把这种粒子命名为"质子"。



图 3-40　卢瑟福在实验室

1920 年以前，人们普遍认为原子核是由质子和电子组成的。但卢瑟福根据氮衰变为氧的实验事实判定，质子(即氢核)是氮核的组成部分。而人工核衰变的实现，使卢瑟福敏锐地想到，原子核必定有其内部结构。这就促使卢瑟福在 1920 年提出了大胆却是经过深思熟虑的中子假设。也就

是说，在原子核中，除了质子，还应该有中子。为了检验卢瑟福的假设，卡文迪许实验室从 1921 年就开始了寻找中子的实验工作。

1921 年，卡文迪许实验室的两名研究人员进行了一系列实验，希望能在氢放电管中探测到这种中性粒子的生成过程，但都没有获得成功。1923 年，查德威克(1891—1974，图 3-41)的实验也没有效果。1924 年，查德威克设想用 200 kV 的电压来加速质子，并将高速的质子打入原子以寻求一些证据，但因无法获得大规模高压装置，无果而终。



图 3-41　查德威克像

从 1928 年起，德国物理学家玻特(1891—1957)和他的学生贝克尔利用钋源发射的 α 粒子轰击一些轻元素物质，发现元素铍有一种特殊的性质。他们用钋源产生的 α 粒子轰击铍靶，原想打出质子，但未发现质子，却发现一种穿透力很强的中性辐射。该辐射能穿透铅板，通过两年的反复实验，他们断言这是具有极高能量的 γ 射线，并在 1930 年发表了实验结果。

1931 年，约里奥-居里夫妇(居里的女儿伊伦·约里奥-居里，1897－1956；居里的女婿弗雷德里克·约里奥-居里，1900－1958，图 3-42)对玻特的实验进行了研究。他们用石蜡把铍板与测量仪器隔开，插入石蜡板后发现仪器记录到的辐射要比插入石蜡板前强得多。在有石蜡板时，记录到的是质子；在没石蜡板时，却是不带电的射线。遗憾的是，他们在肯定石蜡发出的是质子流之后也和玻特一样把铍辐射看成是 γ 射线。



图 3-42　约里奥-居里夫妇像

1932 年 1 月，约里奥-居里夫妇宣布，铍辐射的能量极大，它可以把氢核(即质子)从石蜡板中撞击出来，并能用云室拍到质子流的照片。约里奥-居里夫妇的实验对查德威克有很大的启发。阅读了约里奥-居里夫妇的文章(其中报告了铍辐射有其惊人的特性)后，他和卢瑟福都不相信 γ 射线能有这样大的能量——能够把质子撞击出来。他们认为，这种中性辐射很可能就是卢瑟福本人曾经预言的中子。查德威克重新进行了实验，证明这种“铍辐射”应是一种实物粒子，它的质量与质子的质量很接近。

通过以上实验，查德威克在 1932 年 2 月 17 日发表了题为《中子可能存在》的

论文，证明铍辐射的奇异效应是某种中性粒子的作用。他在论文中肯定了“这一辐射不是γ光子(也称为γ射线)，而是质量与质子几乎相同的粒子”。

查德威克精确推算出中子的质量，并详尽地分析了中子的性质，以确凿的事实证明了中子的存在。由此，卢瑟福曾假设的中子终于被发现了——准确地说，是被证明了。

卢瑟福的故事

1. 最“绝妙”的一次玩笑

1908年，作为物理学家的卢瑟福获得了当年的诺贝尔化学奖，他对自己获得的不是诺贝尔物理学奖感到有些意外，风趣地说：“世界上最快的化学变化莫过于我了。我摇身一变，竟然由一个物理学家变成了一个化学家。”“这是我一生中遇到的最绝妙的玩笑了！”

由于卢瑟福具有认准目标就百折不回、勇往直前的精神，学生们给他起了个绰号——鳄鱼，并且还把鳄鱼徽章装饰在实验室门口。鳄鱼的特征就是从不回头，它总是张开吞食一切的大口，勇往直前。

2. 测量结果不要随便记录在零散纸上

卢瑟福对于实验的各种细节要求非常严格，他给自己的助手和学生制定了许多实验规范，并且严格要求他们在进行实验的过程中遵照执行。有一次，卢瑟福和一个助手一起实验。卢瑟福让助手把读数记录下来，不巧的是，助手忘记带记录本了，随手就拿起一张纸来准备记录。卢瑟福一把夺过纸，严肃地说：“我早就说过，测量结果不要随便记在零散纸上，你怎么忘记啦！”助手低声说：“那我现在记在哪里呢？”“记在你衣服的袖子上，这样就不会忘记了！”

3. 战俘营里的实验室

1914年，第一次世界大战爆发，德国和英国成为敌对的双方。当时，查德威克正在德国柏林访问，被德国政府当成英国“俘虏”拘押了起来，关在战俘营里。据说，开始的时候，查德威克因为没有知音，在战俘营里面闷得发慌。后来，战俘营里来了一位名叫埃利斯的英国青年军官，查德威克就以极大的热情给埃利斯讲解起原子物理来，埃利斯也因此在战后成为一名原子物理学家。查德威克的这种科学精神得到了德国同行的同情和赞赏。在德国同行的争取下，战俘营允许查德威克在里面建立一间实验室，用以进行放射性实验。

威耳孙发明云雾室


图 3-43　威耳孙像

有一年暑假，J. J. 汤姆孙的学生 C. T. R. 威耳孙(1869—1959，图 3-43)在苏格兰的本尼维斯山气象站参加观测活动。在清晨，威耳孙站在高山之巅注意到山顶形成的一种奇特的雾景——云雾效应，这使他对云雾的形成机制发生了浓厚的兴趣。

大约就在赫斯发现宇宙线的同时，威耳孙发明了一种研究粒子的重要装置——云雾室(简称“云室”)。

在实验室中，威耳孙使潮湿的空气在密闭的容器中膨胀。由于与外界隔绝，膨胀时空气的温度降低了，部分湿气(小水滴)就凝聚成雾或云，好像是把云雾装入一个盒子中。这是受到云雾效应的启发。大约经过了十年的实验与改进，威耳孙终于在 1911 年研制成功一种充满蒸气的装置。由于蒸气是饱和的，带电粒子在高速行进时，由于高速行进的粒子不会造成大片的云雾，只形成一串小水滴，这种小水滴恰到好处地显示出粒子运动的轨迹。因此，人们就叫它“云雾室”或“云室”。又由于这是威耳孙发明的，它也被称为“威耳孙云室”。

正电子的发现


图 3-44　安德森在实验室

1930 年，美国物理学家安德森(1905—1991，图 3-44)开始在密立根的指导下研究宇宙线。与别人研究不同的是，安德森在他的研究中应用了云室。安德森先设计了一块铅板，用以隔开云室。这块铅板并不能阻止宇宙线，但可使宇宙线中的粒子速度放慢。这放慢速度的粒子被引入磁场中，在磁场中发生了明显的弯曲(如果没有铅板作用，宇宙线中的粒子几乎不会弯曲)。1932 年，安德森在云室中发现，有一种粒子的行为很像是飞奔的电子，但弯曲的方向与电子正相反。怎样解释这种现象呢？安德森认为，这很可能是一种带正电的“电子”，它与电子带的电荷相反，但别的都一样。看样子，这好像是一个极其“普通”的发现。

1936 年，安德森又发现了一种新粒子——μ 子，它的质量约为电子质量的二百多倍。这也是一种重要的粒子，安德森因此与赫斯分享了 1936 年的诺贝尔物

理学奖。

安德森的同学、中国物理学家赵忠尧(1902—1998)对电子的发现也有贡献。在赵忠尧的实验中,他已观察到正负电子对的产生与湮灭现象。

在此之前,其他一些物理学家在一些照片中也发现了正电子的径迹,只是当时这些径迹并没有引起他们的注意,或是做了错误的解释。英国的布莱克特在安德森前曾观察到正电子的存在,但由于过于谨慎,未能及时发表。约里奥-居里夫妇在1931年末就已观察到正电子的径迹,但他们把它理解为向放射源移动的电子,而不是从源发出的正电子。

1927年,赵忠尧来到美国加州理工学院留学,做密立根的研究生。密立根为赵忠尧提出的题目是"硬伽马射线通过物质时的吸收系数"。当时,物理学家普遍认为,硬伽马射线通过物质时的吸收主要是由自由电子的康普顿散射引起的,计算吸收系数所依据的公式是刚刚问世的"克莱因-仁科公式"。赵忠尧的实验数据要全部采用这个公式进行计算,以增强数据的实在性,而且借此还可以验证克莱因-仁科公式是否正确。

实验进行了一年多的时间,在进行总结计算时,赵忠尧发现,硬伽马射线通过重元素(如铅)所得到的吸收系数比公式计算的结果高约40%。他将此写成论文,并交给密立根。密立根对此也没有十分的把握,搁置了3个月还不能决定是否发表。在另一位教授的劝说下,密立根才消除了对赵忠尧实验可靠性的疑虑,并同意发表。1930年5月,美国《国家科学院院刊》发表了赵忠尧的《硬伽马射线吸收系数的测量》。在文中,赵忠尧比较了硬伽马射线通过轻元素物质和重元素物质的吸收系数。此外,赵忠尧还提出了一个重要的问题:硬伽马射线对轻、重元素物质吸收系数不同意味着什么?

在这个基础上,赵忠尧又提出研究硬伽马射线与物质相互作用的机制问题。在实验中,赵忠尧首次发现,伴随着硬伽马射线在重元素中的反常吸收,还存在一种从未见过的特殊辐射现象。这种辐射非常弱,其能量为0.5 MeV(兆电子伏特)。赵忠尧将实验结果整理成第二篇论文——《硬伽马射线的散射》,并于1930年10月发表在《物理评论》上。正是在赵忠尧的启示下,赵忠尧的同学安德森在云室中注意到正电子的径迹。

正电子的发现是大量基本粒子发现的开始。它不仅给基本粒子增加了一个新成员,同时也证实了狄拉克的理论。正电子的发现还改变了基本粒子是固定不变的旧观念。更重要的是它第一次证明了反粒子的存在,显示了物质的一种基本对称性,为以后在实验上继续寻找其他粒子的反粒子创造了先例。正电子的发现,在物理学发展史上是一个重要的里程碑。

狄拉克的预言——反物质


图 3-45 狄拉克像

在安德森发现正电子的几年前，英国物理学家狄拉克(1902—1984，图 3-45)正在研究量子力学。他运用狭义相对论的公式进行数学推导时发现了一个令人感到意外的结果：电子可以具有负能量。通常，电子只具有正能量，谁也没有见过具有负能量的电子。按照常规的方法，就像解方程时出现虚数一样，可以将它舍去。但狄拉克不这样想，他大胆地假设，有两种电子，它们除了电荷一正一负之外，别的数据都是一样的。为此他将这个电子的"孪生兄弟"称为"反电子"。

"反电子"易命名，但它的存在是否能得到确证则是另一回事。谁知道，只几年后，年轻的安德森就在实验时偶然地从宇宙线中发现了它。不过安德森并不知道狄拉克的研究结论。他要为自己发现的粒子起个名字。与狄拉克的想法不同，因为新粒子带正电，那就叫它"正电子"吧！结果，大家都叫这种粒子为"正电子"，就没人叫它"反电子"了。

1933 年，狄拉克获得了诺贝尔物理学奖。在获奖讲演中，狄拉克进一步预言了反质子的存在。当然，反质子的发现就不那么容易了。直到二十多年后才发现它，但反质子的发现不是"等宇宙的恩赐"，而是在庞大的粒子加速器中产生的，同样在云室中找到了它的踪迹。

正电子与反质子以及多种反粒子的发现，表明正、反粒子在宇宙中成对存在应是一种极其普遍的现象，任何一种粒子都有与它对应的反粒子的存在。这种正、反粒子共同存在的现象，实际反映着客观的物质世界实际上是由正反两类粒子构成的，并且反映着一种正粒子与反粒子的对称性。正是这种认识使人类关于物质世界的认识大大前进了一步，同时也大大地激发了人们的想象力。一时间，人们设想出反原子核、反原子、反分子、反物质，这些反粒子构成的"反世界"也同我们一样，有"反动物""反植物""反人"等。这只是一些漫无边际的玄想吗？不完全是。1978 年，人们观测到在银河系中心存在大量正电子，是不是那里真的存在一个"反……"！1996 年，科学家还观测到在银河系中心外 3 000 光年处有一处反物质"喷泉"。

宇宙线与反粒子的发现使粒子物理学的研究获得了极大的发展，也大大促进了人们对客观世界的认识，对 20 世纪科学的发展具有重大的意义。

反质子的发现

正电子的发现证实了狄拉克反粒子理论，一些理论物理学家开始认真对待这一理论。1934年，奥地利物理学家泡利与克拉夫证明，即使不能形成稳定的负能粒子海，也会有相应的反粒子存在。于是人们就开始寻找其他粒子的反粒子。



图 3-46　塞格雷像

塞格雷（1905—1989，图 3-46）是美籍意大利物理学家。1928年毕业于罗马大学，获得哲学博士学位。在罗马，塞格雷结识了费米。在费米的组织下，拉塞蒂、塞格雷等人创立了罗马科学团体。他们的工作取得了出色的成就，成为当时世界上最重要的物理研究中心之一。1935年，费米的科学团体就解散了，塞格雷离开罗马到西西里岛的巴勒莫大学。第二次世界大战爆发前，塞格雷于1938年移居美国，任加利福尼亚大学副研究员。1946年回到加利福尼亚大学任教。

塞格雷是当代杰出的核物理学家和反物质的主要发现人之一。早期，他主要从事X射线和原子光谱学研究，后来致力于原子核物理研究，取得了丰硕的成果。

20世纪20年代末期，塞格雷和费米共同从事研究工作，为了彻底弄清人工放射性，他们设想利用中子作为入射粒子来轰击原子核。这一设想开创了崭新的粒子物理发展道路。经过三年多的不懈努力，他们发现了约40种新的放射性物质。1934年秋，他们发现，通过石蜡过滤后的中子产生的核反应效果极为突出，从而获得了核物理发展中的重大发现——慢中子效应。1937年，塞格雷和佩里埃合作，在伯克利回旋加速器上利用氘核与中子轰击钼发现了第一种人工放射性元素锝。1941年，塞格雷同美国科学家西博格（1912—1999）等人成功地制备了同位素钚，证明了这种物质可以用作核燃料，为原子弹的研制创造了条件。1943—1946年，他在物理学家奥本海默（1904—1967）领导的洛斯阿拉莫斯实验室工作，在原子弹的研制中发挥了重要作用。二战后，塞格雷致力于反物质研究。

美国物理学家张伯伦（1920—2006）的主要研究课题是核物理学。早在1948年，他曾利用一台高能回旋加速器，研究了原子核中质子和中子的极性与相互作用问题。此后不久，他开始致力于反质子的探测工作。经过多年努力，终于在1955年证实了反质子的存在。由于这一重大发现，他与塞格雷分享了1959年度诺贝尔物理学奖。

早在1928年，狄拉克便预言了反质子的存在，但证实它的存在却花了二十多

年的时间。根据狄拉克的理论,反质子的质量与质子相同,所带电荷相反,质子与反质子成对出现或湮没,用两个普通的质子碰撞便获得反质子,但反质子的产生需要的能量至少68亿电子伏特。1954年,在加利福尼亚大学的劳伦斯辐射实验室,建成了64亿电子伏特的质子同步稳相加速器,为寻找反粒子提供了条件。1955年,张伯伦和塞格雷用上述加速器证实了前一年人们所观测到的反质子的存在。由于反质子出现的机会极少,大约每1 000亿高能质子的碰撞,才能产生数量很少的反质子,他们的实验小组仅测到60个反质子,表明证实反质子的存在极为困难。不久他们又发现了反中子。尽管高能粒子打靶时也能产生反中子,但由于反中子不带电,更难从其他粒子中鉴别出来。他们利用反质子与原子核碰撞,反质子把自己的负电荷交给质子,或由质子处取得正电荷,这样,质子变成了中子,而反质子则变成了反中子。

发现反西格玛负超子

20世纪50年代,反粒子研究成为科学技术进步的一个标志,不仅在美国和欧洲受到极大的重视,当时以苏联为首的社会主义阵营也在此方面与之展开了激烈的竞争。在苏联杜布纳成立了联合原子核研究所,除了苏联,还有中国、罗马尼亚、匈牙利、波兰、捷克斯洛伐克、越南等十余个国家参与研究所的一些国际合作项目。1956年,中国物理学家王淦昌(1907—1998,图3-47)代表中国参加杜布纳研究所的工作。他在这里先任高级研究员,后任副所长,并且领导了有几十人参加的研究集体。



图3-47　20世纪80年代王淦昌在杜布纳联合原子核研究所做学术报告

这时杜布纳刚建成一个能量达10^{10} eV(100亿电子伏特)的质子同步加速器,比美国伯克利的质子加速器还要大。这为激烈的科学技术竞争创造了较好的条件。王淦昌负责寻找新粒子的研究工作。这无疑是最富于竞争性和挑战性的课题。1959年3月9日,王淦昌小组传来了令人振奋的消息,他们从4万张照片中挑选出一张具有反西格玛(即Σ)负超子事例的图像。王淦昌在杜布纳发现了反西格玛负超子,是该研究所取得的最重要的成绩之一。

王淦昌聪明好学,刚考到清华大学时,他迷上了化学。后来,在著名物理学家叶企孙鼓励下,王淦昌对实验物理学产生了浓厚的兴趣。大学毕业后,王淦昌到

德国去留学。回国后一直坚持研究，取得了很好的成绩。他先是对中微子提出了很有价值的看法，后又发现了反西格玛负超子。他在中国的核武器研究和核电开发上也做出了很大的贡献。

夸克理论的提出

1964 年，当时发现的新粒子已近百个，并且新的粒子在持续发现中，其中大部分是参与强相互作用的粒子，因此，这种参与强相互作用的粒子也被称为“强子”。美国物理学家默里·盖尔曼（生于 1929 年，图 3-48）在前人研究的基础上提出了“夸克”粒子的想法。同时，乔治·茨威格（生于 1937 年）也独自提出了类似的想法。茨威格将之称为“爱斯”——即扑克牌中的“A”。


图 3-48　盖尔曼像

通常人们总把电子看成最小的电单位，当说到一物体所带的电荷，往往可以看成是一个电子电量的若干倍。盖尔曼的夸克是带有分数电荷的粒子，这种想法太离奇古怪了。更有甚者，盖尔曼的“夸克”原来是一位德国作家詹姆斯·乔伊斯的小说《芬尼根的祭礼》中海鸥的叫声。所以，当盖尔曼将文章寄给美国的《物理快报》时，该杂志拒绝发表。这样，盖尔曼只得将文章转投欧洲的《物理学快报》。

夸克是构成已发现的粒子的更基本的粒子，也称为“夸克子”或“夸克粒子”。这些更基本的粒子像“积木块”一样，可以按照一定规则搭建。夸克只是“基础粒子”，分别是 u 夸克（上夸克）、d 夸克（下夸克）和 s 夸克（奇异夸克）。最有趣的是，夸克具有分数电荷。例如，上夸克的电荷为$\frac{2e}{3}$，下夸克的电荷为$-\frac{e}{3}$，奇异夸克的电荷为$-\frac{e}{3}$。这样，构成中子的夸克为 2 个下夸克和 1 个上夸克，写作（udd）；构成质子的夸克为（uud），其电荷为：中子为 0，质子为 1。

关于强子结构，中国理论物理学家自 1965 年也开始进行研究。到 1966 年，北京基本粒子物理小组提出了“层子”模型。“层子”的意思是，强子是复合粒子，它们是由更小的基本粒子——“层子”构成，而“层子”并非是最终的基本粒子，它只是物质结构无限层次中的一个层次。“层子”表现的一种科学哲学思想是：物质是无限可分的，而且“层子”也是无限可分的。

粲夸克的发现

20 世纪六七十年代，世界上建立起一些能量更高的加速器，这为研究强子结

构提供了更好的条件。特别是 1974 年 8 月，美籍华裔物理学家丁肇中的研究小组在布鲁克海文实验室的质子加速器（能量为 330 亿电子伏特）上发现了一个新的粒子；同时，在美国西海岸的斯坦福大学直线加速器中心里希特小组也发现了类似的粒子。这两个小组都于 11 月份宣布。丁肇中将此粒子命名为“J”，其形象与中文的“丁”字相近，寓意为中国人发现的粒子；里希特则将其命名为“ψ”。因此，人们常称其为“J/ψ”粒子。不久，在意大利和德国的加速器上也相继观察到这个粒子。为此，丁肇中与里希特一起分享了 1976 年的诺贝尔物理学奖。

里希特（生于 1931 年，图 3-49）是美国物理学家。1952 年毕业于麻省理工学院，1956 年获哲学博士学位后，他去斯坦福大学研究高能物理学，并一直在此工作。在这里，里希特负责建造了世界上第一对电子贮存环。20 世纪 60 年代，他又设计了斯坦福正电子加速环，以提高粒子的能量量级。斯坦福巨大的加速器使得里希特于 1974 年发现了 ψ 粒子。


图 3-49　里希特像

J/ψ 粒子的质量很大（31 亿电子伏特），是质子质量（9.39 亿电子伏特）的三倍多，它的电荷是 $\frac{2e}{3}$。但 J/ψ 的寿命却出奇地长，达 10^{-20} s；其寿命比典型的能量为 30 亿电子伏特的强子要长一千多倍。为了说明 J/ψ 粒子的性质，人们提出了一种新的夸克——粲夸克，即 c 夸克。J/ψ 是由一个粲夸克和一个反粲夸克组成的粒子。


图 3-50　丁肇中像

丁肇中（生于 1936 年，图 3-50）是美籍华裔物理学家。1956 年到美国密执安大学学习，并从机械专业转到物理专业。1962 年获得该校的博士学位，后去哥伦比亚大学和麻省理工学院任教。丁肇中的实验工作主要在 DESY（位于德国汉堡的“德意志电子同步加速器研究中心”）、CERN（位于瑞士日内瓦的“欧洲核子研究中心”）和美国布鲁克海文实验室进行。1974 年夏，丁肇中的小组在布鲁克海文实验室发现了一个寿命很长的重粒子。

丁肇中对中国科学事业的发展也做出了贡献。1977 年，他受中国科学院高能物理所之邀访华。中国大力发展高能物理，需要一批实验人才。因此，丁肇中接收了 27 名中国物理学家随他一起到 DESY 学习和工作。

由于夸克与夸克是被“胶合”在一起的，这种具有胶合作用的粒子就称为胶子

(gluon)。20世纪70年代,理论物理学家在分析中微子、核子和电子相互作用之后,认为胶子对夸克的作用是确实的。但是,如何从实验上找到这种粒子呢?胶子的脾气很古怪,找到它是很困难的。不过,人们想,高能电子碰撞可以使产生的粒子集中成两股细细地喷射出来。这种现象被称为“双喷注”现象。它是两种夸克变化所致。如果强子中除了夸克还有胶子,那么就会产生第3股喷注。理论上的预言是不错的,但验证它并非易事。

在DESY,1978年建成了佩特拉(PETRA)。这是当时世界上能量最高的正负电子对撞束贮存环。加速器的周长为2 300 m,功率为4.5 MW,设计能量高达190亿电子伏特,并可使这样高能量的正电子与电子相撞。

在这个对撞机上工作的有4个小组,其中1个小组是丁肇中领导的。这个小组由来自5个研究单位的科学家组成,其中就有中国的那二十多位物理学家。他们的小组被称为马克-杰(Mak-J)。Mak-J实际上就是一个大型探测装置的代号。

这4个小组展开了竞赛,看谁先发现胶子。1979年底,Mak-J小组最先从实验上看到“三喷注”现象。这第3股喷注可以解释为是胶子引起的。

第3代夸克的发现

盖尔曼和茨威格提出夸克模型时只需要3个夸克就能解释强子的性质了,这时(20世纪60年代),人们从实验上证实了上夸克、下夸克和奇异夸克。1974年发现了粲夸克。到此为止,人们发现了前2代的夸克。其中第1代夸克u和d构成了我们的现实世界,加上电子和中微子ν_e就可以说明宇宙中的稳定物质了。第2代的夸克和轻子与中微子,即s夸克和c夸克,μ子和中微子ν_μ。它们不仅说明了一些新发现的粒子,而且表现出基本粒子发现的历史。它就像按“世代”繁衍一样,粒子的“世代”也在发展着。

从20世纪70年代以来,第3代夸克的位置也开始填补。1975年,斯坦福直线加速器中心(SLAC)的A.玻尔(生于1922年)及合作者发现了一种很重的轻子——τ子。它属于第3代轻子,从理论上讲,在粒子的世界中就对应着第3代夸克。1977年,第3代夸克是在美国物理学家莱德曼(生于1922年)领导的费米实验室和哥伦比亚大学同时发现的新事件开始的。人们将新一代夸克命名为底夸克(b),并力图从实验中找到它;同时,也将它的伙伴命名为顶夸克(t)。

从1983年开始,许多实验室进行寻找顶夸克的实验,并展开了一场“竞赛”。费米实验室的费米碰撞检测器(CDF)在进行实验检测,CERN的物理学家也进行检测,直到1990年也未发现。

1992年5月,费米实验室借助Tevatron对撞机来寻找顶夸克。实际参加实

验的是两个国际性的合作组:CDF 和 D0。其中仅 CDF 就有 398 人,他们分别来自加拿大、美国、中国、意大利和日本等国家,而美国科学家就来自其 14 个州的 34 个机构。1994 年 4 月,他们果然找到了顶夸克。1995 年初,费米实验室的两个实验组正式公布了他们的发现。他们首次观察到顶夸克的实验证据,并测定了其质量。结果比同一代的底夸克重三十多倍,是质子质量的一百八十多倍。这大大出乎人们的预测。这一成果是 20 世纪 90 年代高能物理学的一个重大成果,有关它的发现的新闻被国际合众社选为 1995 年度的“十大国际科技新闻”。

顶夸克的发现表明,它的质量为最轻的上夸克的三万多倍,这对探索基本粒子质量的起源和机制有很重要的启发。这一发现对完善原有的理论有重要意义。

顶夸克的发现是借助世界最大的质子-反质子超高能对撞机,并且花了近 20 年的时间才完成的,说明国际科技合作是具有重要意义的。

夸克囚禁

1973 年,描述夸克之间相互作用的量子色动力学(QCD)建立了。夸克之间的作用力是由带有色荷的夸克交换胶子而产生的,电磁力是由带有电荷的粒子交换光子而产生的,光子无静止质量;所不同的是,光子不带电荷,胶子却带色荷。也许正因此,要做无穷大的功才能将夸克分开。这就像是夸克被“囚禁”起来了。

一般来说,在夸克之中,至少有一种夸克是稳定的。这样,在天体的形成中,在极高温的状态下首批形成的夸克应有一些“化石”留存在地球上,或在陨石中,或在月球岩石中,以独立的形式积存下来。人们在努力去寻找自由的夸克。1977 年 5 月,美国的《物理快报》报告,斯坦福大学的费尔班克、莱瑞和菲利普进行了一个实验:将质量约为 9×10^{-9} g 的超导铌球悬浮在两块金属板的磁场中,加上交变电场,使铌球产生受迫振动,以得到分数电荷的证据。遗憾的是,别人没能重复他们的实验结果。

对于夸克存在的证据已有间接证明其存在。但自由夸克存在的直接证据却一直未找到。对于“夸克囚禁”,有两种说法,即“暂时囚禁”和“永久囚禁”的说法。

“暂时囚禁”的观点认为,自由夸克的质量很大,在形成强子时曾放出巨大的结合能,分离出强子中的夸克需要极大的能量,目前的加速器尚难以做到。

“永久囚禁”的观点认为,夸克永远不可能从强子中分离出来。按照估计,应可以将夸克从强子中分离出来,但直到现在仍未能做到这一点,因此“永久囚禁”的说法更有市场。如果从量子色动力学理论解释,人们则又提出所谓“红外奴役”的说法。为了解决“夸克囚禁”问题,人们试图建成新型的重离子对撞机,在极端的条件下将夸克和胶子从质子中分离出来。总的来说,当前要定量解释“夸克囚

禁”问题和强子结构，仍是高能物理的重要任务。

即将开始的、更加壮丽的相对论篇章

感谢有耐心读到本章的读者诸君，你的坚持是作者所期待的。我荣幸地告诉你：你做对了！接下来，你将会领略到人类最伟大的智慧创造，目睹到一位气贯宇宙的思想家的非凡风采！由于你的坚持，使你能够欣赏到一位思想家的思想杰作，以及分享到他令人吃惊的想象力。人类是善于欣赏的动物，而欣赏的最高境界就是思想的欣赏，爱因斯坦的相对论为我们提供了最为深刻的欣赏对象。

德国著名音乐家瓦格纳曾经说过：“音乐使所有的文明黯然失色！”只是可惜，瓦格纳生活于19世纪，无缘领略爱因斯坦的智慧和相对论的风采。如果他生活在20世纪并有幸能够理解相对论的话，可能他会说：相对论使其他一切黯然失色！

相对论是近代科学产生以来最大的一场思想变革，也是20世纪人类思想史上最伟大的成就之一。它经历了两大发展阶段：狭义相对论阶段和广义相对论阶段，可以说是由爱因斯坦一个人完成的理论壮举，他接续了马赫等人对于经典物理学的批判，不仅解决了经典物理学的理论危机，而且更值得称道的是他建立了一个全新的世界图景。

在相对论中，无论是结论还是推理过程，着实令人拍案叫绝、出人意料，尽管理解起来颇费周折，甚至考验着读者的信心和耐力，但也正是由于它的费解和出人意料，才映现出爱因斯坦的超凡，显示出相对论理论图景的深刻性。这是人类最伟大的智慧之花！有幸得观此景，今生不枉为人矣！

五、狭义相对论



狭义相对论给出了物体在高速运动状态下的运动规律，向我们展现了高速世界的奇妙景观：时钟变慢了，长度收缩了；速度合成法则像魔法一样挡住了通往超光速的道路；而著名的质能关系式，则揭示了质量和能量的内在联系。这些规律对低速运动的宏观物体并不明显，但在研究微观粒子时却显示了极端的重要性，因为微观粒子的运动速度一般都比较大，有的接近甚至达到光速，所以粒子物理学的研究离不开相对论。尤其重要的是，狭义相对论不仅为量子理论的建立和发展创造了必要的条件，而且为原子核物理学的发展和应用提供了根据。

在此，提请读者诸君注意的是，我们抛弃了普及读物不要有公式的写作教条，写入了一些必要的数学公式，因为没有它们，理论的完美性无法体现，叙述的完整性无从谈起，好在具有初中水平的读者就能看懂，所以请你不必担心有理解上的困难，应该大胆地往后读。不过话又说回来，能够阅读本书的你绝不是等闲之辈，这些公式正好为你提供了欣赏物理学的深邃思想与精致之美的机会！

经典物理学理论的危机之一

经历了二百余年的发展与完善，牛顿力学在19世纪因海王星的发现所显示出来的无比强大的理论威力而达到了其发展的高峰，与19世纪发展起来的电磁场理论和热力学一起，构成了经典物理学的三大理论支柱。然而，牛顿力学中的绝对空间问题、电磁场理论中的参照系问题或以太问题以及电磁场理论中的光速不变性与牛顿力学体系之间的矛盾问题，在19世纪下半叶一齐凸显出来，使得经典物理学遭遇到了前所未有的理论危机。

众所周知，运动是相对于参照系而言的，同一物体的运动情况在不同的参照系中观察时情况不同，因此描述运动时必须指明用了哪一个参照系。牛顿力学是以研究运动——准确地说是机械运动为核心的理论体系，所适用的参考系称为惯性参考系，问题就出在这里：什么样的参考系能被看作惯性系？

我们知道，如果我们已经找到了一个参照系为惯性系，那么，所有相对于它做匀速直线运动的参照系都可以称为惯性系。可问题是，这个最初的惯性系到哪里

去寻找呢？通常，可以近似地把地面看作惯性系，但是我们知道，地球是自转的，而且还围绕着太阳运转，因而有向心加速度，所以地球不可能是一个标准的惯性系。以此类推，太阳也不是标准的惯性系。那么，什么物体可以被看成是惯性系呢？牛顿为此假设，这个原初的惯性系就是绝对空间，它与物质无关，是均匀的、静止不动的、能容纳物体及其运动的大容器；与绝对空间相似，也存在一个绝对时间，它存在于物质之外，均匀流逝，与空间及物体无关；尤其是，物体相对于绝对空间的运动意义特殊，被称为绝对运动，而绝对空间本身是绝对静止的。这样，牛顿通过引入绝对空间与绝对时间的概念把对何为惯性系的疑问巧妙地挡出去了，而且赋予了绝对空间作为参照系在所有参照系中最优越的地位。

牛顿还用“水桶实验”来证明绝对空间的存在：把水倒入旋转的水桶中，水的表面就会爬升，慢慢变成凹形，当水的转速与水桶一致，即与水桶相对静止时，水面的凹形最深；当水桶突然停止转动时，水仍在旋转，而且也是凹形的(图 3-51)。所以，水相对于水桶是否有相对运动不是关键。这就意味着水是在相对于绝对空间而运动，从而证明绝对空间是存在的。

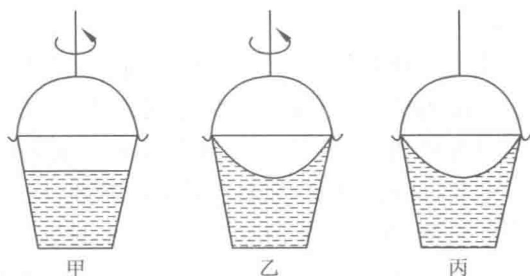


图 3-51 “水桶实验”

可是，睿智的科学家们还是发现了问题的矛盾所在。前已述及，马赫认识到，一方面，绝对时间与绝对空间无法与经验观测相联系，因而既无实践价值又无科学价值，是一种无用的抽象概念，我们所知道的，仅仅是以事实为立足点的相对时间、相对空间和相对运动。另一方面，关于水桶实验中的水面形状问题，马赫认为，这不能解释为水在相对于绝对空间的运动，而是应该理解为水在相对于整个宇宙的旋转，如果水与水桶不动，整个宇宙围绕着水旋转，那么，水面也会成为凹形的。所以，水桶实验并不能成为绝对空间存在的证明。这样，经典物理学在概念上遇到了危机。



图 3-52 马赫像

马赫(1838—1916，图 3-52)是奥地利物理学家、力学家和哲学家，还是经验批

判主义的创始人之一。他出生在今属捷克共和国、当时为奥匈帝国的摩拉维亚的图拉斯，但还在襁褓中时就随全家搬到了维也纳。他的父亲是一位教师，受过良好的艺术与科学教育，给少年马赫系统地讲授了学校课程和多种实用知识与技能。马赫15岁后入读本地高中，1855年进入维也纳大学，1860年获得物理学博士学位。马赫先后在维也纳大学、格拉茨大学、布拉格大学任数学、实验物理学教授，1895年回到母校维也纳大学任哲学教授。

在科学领域，马赫最著名的贡献是1887年进行的气流实验。他第一个发现了运动物体在达到声速时气流的突变(激波)。为了纪念他的贡献，1925年，人们以他的姓氏作为声速的单位：一定温度下空气中的声速为1马赫，两倍音速就称为2马赫，马赫数在当代超音速飞行中成了一个重要指标。

马赫对科学的影响主要是通过他的哲学思想产生的。虽然他多次申明自己是科学家而非哲学家，但由于他对知识如何获得这一问题的强烈兴趣，使他对哲学有了广泛的了解、研究与思考。他自称是“周末猎手”，在哲学中漫游，漫游的结果是产生了《能量守恒定律的历史和根源》《力学史评》《感觉的分析》和《认识与谬误》等一大批思想深邃的著作。

马赫的哲学可以说是一种科学家的科学哲学，而不是哲学家的科学哲学。他的哲学思想的核心——准确地说，是他的科学思想的核心，是反对用观测不到和感觉不到的东西来解释各种现象。虽然这一思想使他拒绝了原子的概念，但他据此对经典力学的绝对时间、绝对空间和绝对运动的批判使他成了物理学革命行将到来的先声和相对论的先驱，对爱因斯坦建立相对论的过程起到了直接的启发作用。另外，这一思想也对20世纪二三十年代量子力学的哥本哈根解释的形成产生了很大的影响。

经典物理学理论的另外两个危机

经典物理学的第二大危机与麦克斯韦的电磁场理论有关——由麦克斯韦方程组推出的光波或电磁波的传播速度即光速是一个定值，问题就来了：这个速度究竟是相对于哪一个参考系而言的？为此，人们设想出了一种特殊的存在、一种绝对静止之物——以太。这样，电磁波被看成是以太振动的传播，光速就是相对于以太这一参照系而言的。然而，有两大困难导致了这一概念的失败：一是以太的性质怪异，二是实验寻找均告失败。性质怪异是指，既然把电磁波看成是以太振动的传播，那么它应该无比坚硬，否则其速度就无法达到光速这么大的数值；另一方面，以太必须无比稀薄，因为我们天天在以太中穿行，并未感受到它的阻碍。既要无比坚硬又要无比稀薄，这样两种非常矛盾的性质集于一身，无论如何也是

不可想象的。关于以太的寻找,先后有两个著名的实验宣告失败:一是1859年阿曼德·斐索进行的流水实验,目的是考察介质的运动对在其中传播的光速有何影响,从而判断以太是否被拖曳;一是1887年迈克尔孙与莫雷做的光波干涉实验,目的是探测地球相对于以太的速度。这两个实验的零结果表明它们从人们期待的角度来看是失败的实验,但从另一个角度来看却是极为成功的实验:它们证明了以太是不存在的!其实,以太概念对于电磁场理论而言是多余的,没有这一概念,这个理论照样成立。剩下的问题是:如何理解或处理光速的不变性?

经典物理学的第三个危机,是牛顿力学与麦克斯韦电磁场理论的协调问题。麦克斯韦理论本身显示,无论是由静止的人还是由运动的人来测量,无论光源运动还是静止,光速都是相同的!这就与牛顿力学中的伽利略速度相加定律(即伽利略变换)相矛盾。按照这个速度相加定律,人在运动的火车上相对于火车静止时,人相对于地面的速度就是火车的速度;当人相对于火车运动时,人相对于地面的速度则是二者之和(同向运动时)或是二者之差(反向运动时)。但是现在,无论人静止还是运动、无论光源静止还是运动,测出的光速都相同。这显然违反了速度相加定律,实在令人费解!

这第三个危机使问题达到了异常尖锐的程度,是压垮骆驼的最后一根稻草。不过,伽利略速度相加定律(伽利略变换)的基础是绝对时空观。所以,危机的总根源在于经典的绝对时空观出了问题。

狭义相对论的助产士——彭加勒

19世纪末物理学理论的危机把物理学家带入了苦难的深渊,考验着人类的智力能力。是危机,更是机遇,正所谓"山雨欲来风满楼",物理学正处于一场大革命的前夜。

危机来临后,为了摆脱困境,各式各样的假说应运而生:

1904年,洛伦兹发展了他的思想,并引进了运动参考系中"局部时间"的概念,提出了高速运动的参考系与静止参考系之间的时间、空间坐标的变换公式,法国数学家、物理学家彭加勒建议把它称为"洛伦兹变换"。

彭加勒甚至走得更远,他引进了四维时空的观念以及相应的一套处理方法,并指出,物理方程对洛伦兹变换应当具有不变的形式。



图3-53 彭加勒像

彭加勒(1854—1912,图3-53)在中国的物理学界和哲学界被译为"彭加勒",但在数学界则被译为"庞加莱"。

最近十年来，数学中关于庞加莱猜想的突破性进展使他广为人知。

他出身于法国的显赫世家，双亲智力都很高，他则是一个智力超常、早熟的儿童，虽然五岁时患的白喉病而使他后来不能顺畅地口头表达，但这并没有影响他的智力发育。他特别爱好读书，而且速度惊人，记忆迅速、准确、持久。1862 年，他进入著名的南锡中学，1870 年因普法战争而一度中断学业。1871 年恢复学业，次年两次荣获法国公立中学生数学竞赛头等奖，从而于 1873 年被多科工艺学校录取，1878 年毕业。1879 年，庞加莱撰写了微分方程方面的博士论文，获得了博士学位。他先在卡昂大学任讲师，后又于 1881 年任巴黎大学教授，直至去世。

在数学领域中，庞加莱是他那个时代最杰出的数学家，他的研究涉及数论、代数学、几何学、拓扑学、天体力学、数学物理、多复变函数等众多领域，在数学的这些主要领域中都做出了非凡的业绩，被认为是“最后一个数学全才”。他的成果在现代微分方程与动力系统及混沌理论中都是重要的基础性工作。

在物理学领域中，彭加勒对经典物理学进行了系统而深入的研究：1897 年，发表了论述“空间相对性”的文章，堪为狭义相对论的萌芽；1898 年，彭加勒又发表了“时间的测量”一文，提出了光速不变性假设；1902 年，他又阐明了相对性原理；1904 年，他把洛伦兹关于两个惯性参照系之间的坐标变换关系称为“洛伦兹变换”，并认识到洛伦兹变换构成一个群；1905 年，先于爱因斯坦发表了“论电子的动力学”。

在哲学方面，彭加勒是约定主义哲学的代表人物，认为科学公理是方便的定义或约定，可以在一切可能的约定中进行选择，但要以实验事实为依据，以避开矛盾。彭加勒的哲学著作《科学与假设》《科学的价值》《科学与方法》（图 3-54）是他那个时代最有价值的哲学著作。



图 3-54　彭加勒的哲学著作

彭加勒的物理学研究与哲学思想对爱因斯坦思想的发展产生了深刻的影响。

爱因斯坦的观念突破

这是一个需要巨人并且产生了巨人的时代！这时候，爱因斯坦出场了。

爱因斯坦(图3-55)在16岁的时候就了解到光是电磁波，有一天，他突然产生了这样一个问题：如果一个人以光的速度飞行，他看到的电磁波会是什么样子呢？在这一问题的引导下，他考入瑞士苏黎世联邦工业大学之后，广泛地阅读了基尔霍夫、赫兹、麦克斯韦和马赫等大师的著作。大学毕业后的爱因斯坦失业了，后来在大学好友格罗斯曼的帮助下，他在瑞士的伯尔尼专利局找到了一份技术员的工作，工作轻闲(图3-56)，这使他有了充分的时间和自由研究他所感兴趣的问题。他的目光聚焦在了物理学界的前沿动态，在许多问题上深入思考，形成了自己独特的见解。他反复研究了麦克斯韦的电磁场理论，特别是经过赫兹和洛伦兹发展和阐述的电动力学。



图3-55　少年爱因斯坦

爱因斯坦坚信电磁理论是完全正确的，但是，绝对参照系以太的存在问题使他不安。他阅读了许多文献后发现，所有试图证明以太存在的实验都是失败的。他还认识到，以太在麦克斯韦和洛伦兹的电磁理论中是没有实际意义的。于是问题的焦点便指向：以太绝对参照系是必要的吗？电磁场一定要有荷载物吗？由此，爱因斯坦着手思考以太问题，并一次性永远地解决了它。他的突破口在于，在下面三者之中存在矛盾，不可能都正确：麦克斯韦电磁理论、相对性原理、伽利略变换。其中，相对性原理来自于伽利略的认识：一切彼此做匀速直线运动的惯性系，对于描写机械运动的力学规律而言都是完全等价的。也就是说，不存在一个比其他惯性系更为优越的惯性系。或者说，在一个惯性系内所做的任何力学实验，都不能让我们确定这一惯性系是处在静止状态还是匀速直线运动状态。



图3-56　在专利局工作时的爱因斯坦

承认麦克斯韦电磁理论和相对性原理，就会得出与源于生活常识的伽利略变换(即速度相加定律)相矛盾的结果，这一度成为爱因斯坦的难解之谜。在困难来临之时，他与他的同学、好友贝索讨论了一个下午，彻底明白了问题的关键。或

许，贝索使他想起了他们共同阅读彭加勒等人的著作做的相关分析。最终的选择是，爱因斯坦相信麦克斯韦理论的正确性，也相信相对性原理（坐标系的平等性）不仅在力学中成立，而且也应当在电动力学中成立，即电磁理论对于各个惯性系而言应该具有同样的形式。所以，唯一有问题的便是伽利略变换，它是矛盾的关键。而伽利略变换与绝对时空观是一脉相承的，基于马赫的分析与批判，绝对时空观没有实际意义，因此爱因斯坦勇敢地抛弃了绝对时空观及其衍生的伽利略变换，确立了麦克斯韦电磁场理论和相对性原理的基础地位。而承认麦克斯韦理论就意味着承认光速在不同惯性参照系中的相同性即不变性，因此爱因斯坦确立了如下两个基本的假设：

（1）相对性原理：所有惯性参考系都是等价的。或者说，一切物理规律（不论是力学规律还是电磁规律）对于所有惯性参照系都可以表示为相同的形式。也可以说，在任何一个惯性系中，无论使用什么样的物理实验，都不可能判断该惯性参考系的运动情况。

（2）光速不变原理：真空中的光速在不同的惯性系中都是相同的。即光速既不依赖于光源与观测者间的相对运动，也不依赖于光的传播方向。

相对性原理指出了各个惯性系的平等性，而光速不变原理实际上也是对他16岁时所提问题的回答。我们马上就要看到，它们彻底消除了人们对牛顿的绝对空间、绝对时间、绝对参考系和绝对运动的幻想。

时间、空间的相对性

相对性原理和光速不变原理显示了爱因斯坦非凡的理论勇气和判断力，为了揭示时间和空间的相对性，爱因斯坦进行了天才的推理。这足以让每一个观赏这一推理过程的人为人类能够产生这么智慧的头脑而震惊和叹服。他的推理表明，绝对时间、绝对空间和绝对运动等概念失效了！

首先，"同时性"是相对的，而不是绝对的。"按照经典力学，相对于一个惯性参照系在不同地点同时发生的两个事件，对于另一个与之有相对运动的惯性参照系来说，也是同时发生的。"这是根据常识得到的判断，很自然。但是，爱因斯坦说："从狭义相对论的观点出发，这种观点是有问题的。"设想有两个观察者，一个在地面上，另一个在车厢里。假设车厢相对于地面做匀速直线运动，其中的观察者在车厢中央点亮一盏灯，那么，由于光速的不变性，车厢中的观察者看来，光线将同时到达车厢的前壁和后壁，也就是说，在他看来，车厢的前后壁是被"同时"照亮的。然而，在地面上的观察者看来，光传播的过程中车厢向前运动了一段小距离，使得向后壁照射的光走的距离较短，向前照射的光走的距离较长，而光速是相

同的，这样地面上的观察者就会看到，车厢后壁先被照亮，然后前壁才被照亮（“后壁先被照亮”这个特点很重要，是理解同时性的相对性的关键。为了记忆以及方便后面的叙述，作者称之为“后端优先律”），所以是不同时的。同理，如果地面上的观察者观测到了两个同时的事件，那么，在运动的观察者看来则是不同时的。这样，“同时性”就是一个相对的概念，不是绝对的，它取决于观察者的运动状态。这就否定了牛顿力学中作为基础的绝对时间和绝对空间框架。

其次，时间间隔具有相对性。我们还用刚才的两个观察者来完成一个新的观测。假设运动的车厢内的地板上有一盏灯，开灯后让一束光向上垂直照射到天花板的反光镜上，那么，这束光就会被反射回一开始的发光点处。在运动的车厢内的观察者看来，从出射到返回这个一上一下的过程中，这束光运动的路径长度就是车内高度的两倍($2h$)，车厢中的观察者观测到的时间间隔就是这个两倍高度与光速(c)的比值($\frac{2h}{c}$)。但是，在地面上的观察者看来，从出射到到达反光镜再到返回的过程中，车厢已经向前运动了一个小距离。可以想象，车厢在刚发射光时的位置和光又反射到地板时的位置正好处在这个小距离的两端，而光射到反光镜时的位置则处于这两个位置的正中间。于是，光的路径是：一个斜上坡和一个斜下坡，与车厢所走的距离构成了一个等腰三角形，光束运动的路程就是这个等腰三角形的两个腰长之和($2L$)，所用时间也就是腰长之和与光速的比值($\frac{2L}{c}$)。由于两腰长之和大于两车厢高度之和，而光速是一样的，地面上的观察者测出的时间间隔就比车厢中的观察者测出的时间间隔长。这就是说，在车厢中看到的某个过程的时间间隔与地面上看到的同一过程的时间间隔不同，反之亦然。这样，时间间隔并不是绝对的，而是相对的，依赖于参照系的选择。

再次，空间长度也是相对的，同一物体的长度在不同的惯性系中来看是不同的。根源在于，从测量的角度来看，尺子的长度就是在一个惯性系中“同时”测量到的两个端点的坐标值之差，由于“同时”是相对的，在不同的惯性系中测量的长度也就不同。具体地说，相对于观察者运动的物体沿运动方向的长度变短了，这就是所谓的尺缩效应，当速度接近光速时，尺子缩成一个点。

关于长度测量问题，假设有一辆高速行驶的列车，车上的观察者与地面上的观察者都在测量这辆车的长度。地面上的观察者为了测量列车的长度，可以事先在地面上沿列车运动的方向做好一个直线坐标轴，只要同时记下运动列车的车头和车尾的坐标，那么，列车的长度就是这两个坐标值之差。问题就出在“同时”上面。如前所述，地面上的观察者看来是同时的事件，在运动的列车上的观察者看来却是不同时的（地面相对于列车观察者高速运动）——对列车上的观察者而言，

运动的地面高速远去，与车头端对应的地面坐标点成了运动着的地面的后端，根据“后端优先律”，车上的观察者认为，地面观察者先读了车头坐标而后读了车尾坐标，这个过程中列车已经运动了一个小距离（列车的速度越大，这个小距离就越大），所以，地面上的观察者测出的长度要小于列车上的观察者测出的值。

再进一步地说，如果地面上也有一辆列车静止在地面上，那么，在运动的列车上的观察者看来，这辆静止在地面上的列车（相对于观察者是运动的）也是变短的。

当然，上述“同时性”的相对性、时间间隔的相对性以及空间长度的相对性等相对论效应是与运动速度有关的，速度越大（尤其是接近光速时），效应就越明显；反之，低速运动时这些效应就可以忽略了，我们感受不到了，这就又回到了经典力学的情况。所以，经典力学是相对论的低速极限，仍然成立。

总之，与经典力学时空观的孤立性不同，相对论时空观揭示空间和时间都与物质的运动状态有关。因此，相对论的时空观更具有普遍性，经典力学的时空观则是相对论的特例，在宏观低速运动时仍将发挥作用。

洛伦兹与洛伦兹变换

基于相对性原理和光速不变原理，爱因斯坦很自然地得到了相互运动的两个惯性参照系之间的坐标变换关系，即洛伦兹变换：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x-vt}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=\dfrac{t-\dfrac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

在洛伦兹变换中，x、y、z、t 分别是静止惯性系（简称为“静系”）中的坐标和时间，x'、y'、z'、t'分别是相对于它运动的惯性系（简称为“动系”）中的坐标和时间。v 是动系相对于静系的运动速度，方向沿 x 轴。这个变换反映了静系中观察者的观点；在动系中的观察者看来，静系相对于他以速度（$-v$）做匀速运动，他所选用的洛伦兹变换就是上述变换的逆变换：

$$\begin{cases}x=\dfrac{x'+vt'}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\\y=y'\\z=z'\\t=\dfrac{t'+\dfrac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}\end{cases}$$

洛伦兹变换是高速运动的物体在不同惯性参照系之间进行坐标和时间变换时所遵循的基本规律，是狭义相对论中最基本的关系。洛伦兹变换表明，空间和时间并不相互独立，而是一个统一的四维时空整体。在低速运动时，相对速度 v 远远小于光速 c，洛伦兹变换退化为经典力学中的伽利略变换：

$$\begin{cases}x'=x-vt\\y'=y\\z'=z\\t'=t\end{cases}$$

因此，经典力学只是相对论在低速时（v 远远小于 c）的近似。在处理物体的低速运动问题（如天体力学中计算行星的运行轨道）时，可以不用考虑相对论效应。但当处理高速运动比如高能加速器中电子运动的问题时，就需要考虑相对论效应了。

洛伦兹（1853—1928，图 3-57）是著名的荷兰物理学家和数学家。1853 年 7 月 18 日生于阿纳姆，并在该地上小学和中学，成绩优异，1870 年入莱顿大学学习数学、物理学和天文学，1875 年因电磁辐射的研究获博士学位。1877 年，年仅 23 岁的洛伦兹被聘为莱顿大学的理论物理学教授。洛伦兹在物理学上的主要贡献有两个方面：一是创立了经典电子论，认为电是由微小的实体组成的，具有“原子性”，后来这些微小实体被称为电子。洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质，从电子论推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用，即洛伦兹力。二是对麦克斯韦电磁场理论的研究。由于光速是一个不变量，与参考系的选择无关。也就是说，无论由运动的人还是静止的人来测量，光速始终相同；但若用伽利略变换，从一个参考系变换到另一个参考系时，真空中的光速将不是一个不变的量，从而导致对不同惯性系


图 3-57　洛伦兹像

的观察者来说，麦克斯韦方程及各种电磁效应可能是不同的。这就导致麦克斯韦方程组与伽利略变换的不协调。为了解决这个矛盾，洛伦兹提出了另一种变换公式，即洛伦兹变换。若使用洛伦兹变换，麦克斯韦方程从一个惯性系变换到另一个惯性系时保持形式不变，而且还得出了两个重要结论：一是电子的质量必然随着速度的增加而增大；二是光在真空中的速度是一切物体运动速度的上限。后来，爱因斯坦创立的狭义相对论把洛伦兹变换作为相对性原理的一个推论，使其获得了合理性基础。

此外，洛伦兹在科学共同体的国际性交往中具有高超的组织能力。中年以后，他广泛地与国外科学家进行了个人接触：1898 年，接受玻尔兹曼的邀请，为德国自然科学与医学学会的迪塞尔多夫会议物理组做演讲；1900 年在巴黎，为国际物理代表会(世界性物理学家集会)做演讲；他最重要的国际性活动是担任物理学的索尔维会议的定期主席(1911—1927)，这是由于他既具有崇高的学术地位，又通晓多种语言，还善于外交，每次都受到邀请，担任大会主席，他在临终前还主持了最后一次会议。在这些国际性的集会中，洛伦兹成为公认的领袖，他渊博的学问、高明的技术、善于总结最复杂的争论以及无比精练的语言都令与会者非常佩服。

高速世界的奇幻景观——尺缩效应

高速运动物体的一切性质都与低速世界不同，这是狭义相对论向人类揭示的大自然的另一种绝佳风景。

根据洛伦兹变换，我们很容易就可以得到，长为 L_0 的杆沿杆长方向相对于观察者运动时，观察者测出的长度变为：

$$L=L_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

这是长度相对性的一个具体表达。该式表明，观察者看到的物体在运动时，其运动方向上的长度变短了(尺缩效应)。这在低速运动时不明显，一旦运动速度可以与光速相比较时，就非常明显了。比如，一个高速运动的电荷的等势面就不再是静止时的球面，而是在运动方向上变扁了。但在垂直于运动的方向上，长度并不变化。当杆静止时，观察者看到的长度最大，为原长 L_0。起初，这是爱尔兰物理学家斐兹杰惹于 1889 年、洛伦兹于 1892 年各自独立提出的一个假设，并认为这是一种真实的物理效应，会导致物体内的原子结构发生变化，甚至原子内部的电荷分布也发生变化。现在，这一关系成了狭义相对论的一个推论，爱因斯坦认为，这种收缩的相对的，是一种时空效应，构成物体的原子结构及其内部的电荷

分布并不会发生任何变化。而且，尺缩效应是相对的，两个做相对运动的刚性尺，都会认为对方缩短了。

高速世界的奇幻景观——动钟变慢效应

根据洛伦兹变换，我们还能得到另一个有趣的结果：两列平行放置、相对运动的钟，让对方的一个钟依次与自己的一系列钟比较，都会认为对方的（相对于自己运动的）钟变慢了。设固定在速度为 v 的动系中的钟走过了时间 $\Delta t'$ 时，静系中的钟走过的时间为 Δt，按照洛伦兹变换可得：

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

其中

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

称为洛伦兹因子，只要动系速度不为零，其数值一定大于 1，从而有：$\Delta t > \Delta t'$。这样，如果动钟走了 1 s（$\Delta t' = 1$ s），静系中的钟必走过大于 1 s 的时间（$\Delta t > 1$ s）。也就是说，在静系中看来，运动的钟变慢了。如果动系不动，即 $v=0$，则 $\gamma = 1$，$\Delta t = \Delta t'$。所以，所有相对静止的钟运行的快慢是一样的。

反之，在动系中的观察者看来，静系中（比如地面上）固定的钟也是一个相对于他以速度 v 运动的钟，在它走过时间 Δt 的过程中，他看到自己的钟走过的时间 $\Delta t'$ 为：

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

也就是说，他看到地面上的钟也变慢了（$\Delta t' > \Delta t$）。

所以，钟慢效应是相对的，两个相互运动的钟彼此都认为对方变慢了。钟慢效应给出了不同惯性系之间时间进度的关系：运动的钟比静止的钟走得慢，速度越快，走得越慢；若钟运动的速度接近光速，慢得就接近停止了。

钟慢效应是真实的，已经被大量实验证实。例如，名为 μ 子的粒子有一定的寿命，很快由于不稳定而衰变为电子和中微子。实验表明，静止的 μ 子的平均寿命为 2.2 μs，但当它以 $0.99c$ 运动时，寿命延长为 22 μs，与用上式算出的结果精人地一致。

动钟变慢也被称为时间膨胀，如果我们追上动钟并与其同速运动，它的走时又回到了正常的情况。

与动钟变慢效应相关，存在一个所谓的“双生子佯谬”，它是在相对论诞生初期，由法国物理学家朗之万提出的。他说，如果有一对双胞胎兄弟 A 和 B，一个

(比如 A)一直生活在地球上,另一个(B)乘宇宙飞船做星际旅行,回来时,B 将比 A 年轻。如果飞船以接近光速的速度飞行,回来时 B 更年轻,可能 A 已经是一个老头子了。这是真的吗?按照相对论,是这样的!正所谓:"天上方几日,地上已千年!"

高速世界的奇幻景观——星际飞船外的瑰丽景色

我们都有过感受鸣笛的汽车或火车疾驶而来又疾驶而去的过程中喇叭声调变化的经历,先是声调越来越高,然后是越来越低。这叫多普勒效应,是奥地利数学家、物理学家多普勒在 1842 年发现的一个声学现象。原因是,声源(喇叭)高速移近时单位时间内进入人耳的声波数比声源静止时要多,相当于频率越来越高了(蓝移);而驶离时单位时间内进入人耳的波数变少,相当于频率越来越低了(红移)。

人与光源有相对运动时也会产生多普勒效应。不过,光学多普勒效应较为复杂:首先,当光源相对于观察者只有横向运动而径向距离不变时,因钟慢效应造成了多普勒效应。这称为横向多普勒效应——不仅光源上的钟变慢了,而且光源上的一切物理过程也都慢了,导致光源中原子光谱的频率变小(红移)。其次,当光源相对于观察者有径向运动(趋近或远离)时,造成了所谓的径向多普勒效应。而光学多普勒效应的复杂性就在于径向多普勒效应:一方面,光源与观察者趋近时产生了蓝移,远离时产生了红移;另一方面,还有钟慢效应产生的贡献(红移)。所以,横向多普勒效应只有红移,径向多普勒效应既有红移也有蓝移。

此外,我们还有过在雨中行走的经验:我们静止不动时,我们感觉雨滴是从正上方高空落下的;而当我们向前奔跑时,感觉到的雨滴却是从前上方倾斜落下的,而且跑得越快,倾斜得就越厉害。这其实是一个运动(速度)合成现象:我们的奔跑使得雨滴相对于我们有了一个水平方向的分速度,与原来的竖直下落速度一起,合成了它相对于我们的斜向的合速度。根据矢量合成的平行四边形定则,我们知道,两个分速度中一个分速度不变(比如雨滴的下落速度)、另一个分速度(人跑的速度)越来越大时,合速度与不变的分速度之间的夹角就越来越大。所以,我们跑得越快,雨滴轨迹线倾斜得就越厉害,看上去雨滴好像是从前方过来的。在光学中也有与之类似的现象:运动着的观测者观察到的光的方向与同一时间同一地点静止的观测者观察到的方向有偏差。这一现象称为光行差效应,它是由于光速有限以及光源与观察者之间存在着相对运动造成的,只不过在进行速度的合成时,需要考虑相对论效应带来的修正。

多普勒效应与光行差效应会使高速飞行的星际飞船中的宇航员看到两种奇

妙的景象:一种是颜色景观——飞船前方星体射来的光发生了蓝移,后方和侧面的星体射来的光发生了红移,因此会看到前方星体颜色变蓝,后方的星体颜色变红,侧面微红。这种景观是由于光学多普勒效应造成的,速度越大,这种景象就越明显。第二种是凝聚景观——宇航员觉得侧面的星体向正前方聚集,后面的星体移向自己的侧面,就好像正前方是一个"吸引"中心,所有的星体都向正前方聚集,后方的星体越来越少了。越接近光速,正前方的星体密度越大,后方的星体越少。第二种景观是由于光行差效应引起的,原本在飞船两侧的星体因速度的合成使宇航员看来则在侧前方。

高速世界的奇幻景观——运动物体的质量增加效应

以前,在伽利略变换下,牛顿力学在各个惯性系中保持形式不变,但是麦克斯韦方程组却不行。现在,在洛伦兹变换下,麦克斯韦方程组保持形式不变了,牛顿力学却不行了,这就需要对经典力学进行改造。爱因斯坦发现,这需要对质量的概念进行相对论性的修正。为此,他区分了运动质量 m 与静止质量 m_0 的不同,它们之间以下式相联系:

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

这就是说,物体的质量是与其运动速度相关的,速度越大,质量也越大。当然,在低速运动时 m 与 m_0 几无差异,但当物体的运动速度接近光速时,其质量便变得无比巨大了。这完全颠覆了牛顿力学中质量及惯性与物体的运动速度无关的观念。

在此定义下,再定义物体的动量 $p=mv$,即:

$$p=\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

基于这些修改,牛顿第二定律若采取如下形式:

$$F=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$$

便可在洛伦兹变换下保持定律的形式不变。这就实现了经典力学的相对论性改造。不过,修改后的动力学导致了一个很有趣的后果:从质量的相对论修正公式看出,当速度增大时,其质量也在增大;当速度接近光速时,质量接近于无穷大,这使得力所产生的加速度微乎其微。结果是,给一个物体加速时,永远也不可能使其达到或超过光速!光速是一切静止质量不为零的物体运动速度的极限。

这样，相对论动力学向我们阐明了一个基本的事实：光速构成了自然界中物体运动速度的极限。

高速世界的"魔法律则"

高速世界的另一个独特之处，是速度的加法规律与已有的伽利略变换大为不同。现在，假设有两个坐标系：静系 S 和动系 S'，动系 S' 以速度 v 相对于静系 S 运动，并且每一个坐标系中都有一个观察者，他们要观察同一个质点的运动。动系中的观察者看到的质点速度是 u'，静系中的观察者看到的质点速度是 u，根据洛伦兹变换可以推出，这两个观测结果之间满足如下的速度叠加法则：

$$u=\frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}}$$

显然，在动系的速度 v 和动系中的观察者看到的质点速度 u' 不太大时（即在低速运动情况下），$\frac{u'v}{c^2}$ 可以忽略，上式便退回到了我们所熟知的伽利略变换：

$$u=u'+v$$

但是在高速世界，我们会看到，新的变换像魔法一样，保持了整个理论体系的协调。

首先，如果动系以光速 c 运动，即 $v=c$，而其中的观察者发射了一束光，即 $u'=c$，那么，由相对论速度叠加公式可得，静系中的观察者看到的速度为：

$$u=\frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}}=\frac{c+c}{1+c\cdot\frac{c}{c^2}}=c$$

这正是狭义相对论所要求的：在各个相互间做匀速直线运动的惯性系中看到的光速都相同（不变）。

假定 $u'=0.99c$，$v=0.99c$，我们来看看合成后的速度 u 是多大。根据速度叠加公式，我们有：$u=\frac{0.99c+0.99c}{1+0.99c\cdot\frac{0.99c}{c^2}}=0.999\,949\,5c$，即合成速度仍未达到光速 c。所以，不管质点在动系中的速度及动系相对于静系的速度多么接近于光速，静系中的观察者看到的速度还是小于光速，不可能超过光速。如上所述，即使这两个速度达到了光速，合成之后的速度仍为光速，还是超过不了光速。因此，从运动学上我们也得到了与动力学同样的结论：光速是一切物体速度的极限。

这是一个多么神奇的公式呀，在它的统辖之下，在高速世界中，无论物体怎样运动，都保持了既定的秩序而不凌乱。

简单性的美妙公式——质能关系

狭义相对论中最著名的结果就是广为传颂的质量-能量关系式(质能关系式,图 3-58):

$$E=mc^2$$

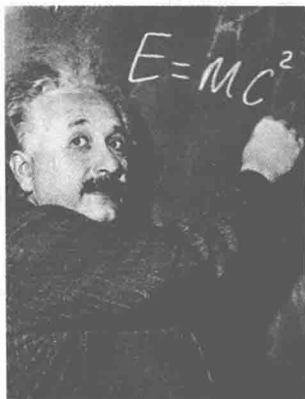


图 3-58 神奇的公式

或许,这也是人类历史上最为有名的公式之一,人们论及爱因斯坦,都会想到这个公式。在某种意义上,它成了爱因斯坦的标志性符号。它告诉我们,多少质量就对应多少能量,多少能量就对应多少质量,质量和能量是同一事物的两个方面,是不可分割而且相互联系着的。

首先,可以把惯性质量理解为能量的一种储藏:惯性不再是物质的一种基本性质,也不是一种不可再简约的量,而只是能量的一种性质。任何物质系统既可用质量 m 来标志它的数量,也可用能量 E 来标志它的数量,凡是有质量的物体都含有能量,即使是静止的物体也蕴含着巨大的能量。这与牛顿力学中的概念大不相同。例如,1 g(注意,仅仅是 1 g)水蕴藏的能量如果全部释放出来,就相当于2×10^4 t 炸药爆炸时所释放的化学能,真是威力无比!所以,相对论向我们展现了无穷的能量源泉。

其次,物体的质量是它所含能量的量度:一个系统的能量减少(或增加)时,其质量也相应地减少(或增加)。正如爱因斯坦所说:"如果有一物体以辐射形式放出能量 ΔE,那么它的质量就要减少$\frac{\Delta E}{c^2}$。至于物体所失去的能量是否恰好变成辐射能,在这里显然是无关紧要的。"因此,能量变化与质量变化相伴而生,可以用质量来量度能量。过去,与一切能量形式(如机械能、热能、电能和化学能等)的转移相伴而生的质量变化是如此之小,以致在实验中人们根本觉察不到。后来,核反应过程中出现的质量亏损现象被观察到了,并发现了原子核内蕴藏着的巨大能量(图 3-59),使人们看到了利用原子能的可能性,为人们开发利用原子能提供了理论基础。


图 3-59 投掷在长崎的原子弹爆炸瞬间

特别有意义的是，静止物体也有巨额能量！这是相对论最重要的推论之一。这一认识，除了在能源开发方面有重大的应用价值外，更具有深远的理论意义。比如，这对粒子问题研究可能是极为重要的：既然一定质量的粒子具有一定的巨额能量，那么，静止粒子内部必然存在着我们尚不知晓的复杂运动或作用！这一点，在粒子结构的研究方面其意义还没有被充分地关注到，对今后有志于粒子结构研究的人而言，这是一个重要的启示，也是一个必要的基础与前提。

此外，物体的总能量 E、静止能量 E_0 和动量 p 之间满足所谓的能量-动量关系：

$$E^2=E_0^2+p^2c^2$$

它与质能关系是等价的，揭示了能量和动量的不可分割性。它们构成了一个整体，称为四维动量。

六、广义相对论



认识更新的世界

观念上的突破、物理上的合理加上逻辑上的严密，使得狭义相对论拥有了巨大的爆发力，它不仅成功使人类摆脱了由绝对时空观所带来的物理学的危机，建构了相对性的时空观，而且使人类对于自然的认识进入了一个新的发展阶段，向我们展现了高速世界的奇妙景观：同时性是相对的，时间、空间也是相对的；通过洛伦兹变换，时间与空间融合在一起，构成了一个四维时空整体；在高速的世界中，时钟变慢了，长度收缩了；而速度合成法则就像一道墙，挡住了通往超光速的道路；此外，通过质能关系式，揭示了质量和能量的内在联系，不仅为量子理论的建立和发展创造了必要的条件，而且为原子核物理学的发展和应用提供了根据。

狭义相对论效应已经被大量实验证实，虽然这些效应在低速运动的宏观物体中并不明显，但在微观世界中却显现出了它的极端重要性：对微观粒子而言，运动速度一般都很大，接近甚至达到光速，相对论效应成为不可忽视甚至是起决定性作用的方面。所以，狭义相对论与量子力学一起，成为粒子物理学研究中必不可少的理论基础。

在狭义相对论逐渐被承认并已经引起了学术界的关注和欢呼的时候，爱因斯坦却在静静地审视着自己的理论，他深知是什么东西令他不安。所幸的是，这不是一个悲壮的开始，而是一个更加辉煌的成功的开端：他开启了通往广义相对论的道路。

爱因斯坦知道，狭义相对论中有两个严重的缺陷：

第一个缺陷是狭义相对论只适用于惯性系，而不是做任意运动的参照系，这就承认了惯性系的特殊、优越地位，还不是真正的相对性思想。从本质上说，狭义相对论只是抛弃了以洛伦兹静止以太形式出现的绝对空间，指出了时间和空间的内在联系，但未能建立起时空与运动着的物质之间的联系，还未能真正摆脱牛顿的“绝对时空”。此外，惯性系不仅很难找，而且无法定义：因为要定义“惯性系”，就需要用到牛顿第一定律（即惯性定律），即以“不受力”为前提，而定义“不受力”

又需要“惯性系”的概念，这就陷入逻辑的循环中。

第二个缺陷是万有引力定律无法被纳入狭义相对论的框架中，无法写成相对论的形式。一方面，光速不变原理的提出取消了绝对同时性的观念；另一方面，万有引力定律是一种超距作用，即传播速度为无穷大的瞬时作用，二者之间存在严重的矛盾。此外，虽然惯性（即质量）与能量之间的关系通过质能关系式得到了完美的体现，但惯性与引力之间的关系却没有得到说明。爱因斯坦清醒地认识到："在狭义相对论的框架里，是不可能有令人满意的引力理论的。"

新的突破：爱因斯坦一生中最快乐的思想

几经努力终至失败之后，爱因斯坦认识到，既然惯性系无法定义，不如舍弃这个概念，而采用任意参照系，把原来的“物理规律在一切惯性系中都相同”这一相对性原理推广为“物理规律在一切参考系中都相同”。这就是广义相对性原理，以前依赖于惯性系的相对性原理则称为狭义相对性原理。

但是，这样一来，问题又来了：与惯性系不同，在一般参考系即非惯性系中，存在着“惯性力”问题，比如，加速启动的火车中旅客桌子上原来静止的小球会向后滚动，好像它受到了一个向后的力的作用，这个力就称为惯性力。好在惯性力有一个特点：它与物体的惯性质量成正比，这与万有引力定律非常相似——万有引力与物体的引力质量成正比。这时，爱因斯坦想到了马赫的认识：惯性力与万有引力都起源于物体间的相互作用。这使他明白了：“惯性”问题和“引力”问题是同一个问题的两个方面，两个困难实际上是一个困难，应该合在一起共同解决。

当他正在思考如何突破狭义相对论的框架，以解决惯性与引力之间的不协调问题时，一个闪念出现了。爱因斯坦回忆说："有一天，突破口突然找到了。当时我正坐在伯尔尼专利局办公室里，脑子里突然闪现了一个念头：如果一个人正在自由下落，他决不会感到他有重量。我吃了一惊，这个简单的思想实验给我的印象太深了。它把我引向了引力理论。我继续想下去：下落的人正在做加速运动，可是在这个加速参照系中，他有什么感觉？他如何判断面前所发生的事情？"这使他马上认识到，那个自由下落的人之所以感觉不到他受的重力，是因为引力场里的牛顿运动方程可以写为：

（惯性质量）·（加速度）=（引力质量）·（引力场强度）

而由于惯性质量与引力质量相等，则：

加速度=引力场强度

因此，任何物体在引力场中的加速度都是相等的，即物体获得的加速度是同物体的本性无关的，这使得引力场与加速度场是等效的。所以，做自由落体运动

的人(在落地之前)感受不到引力的作用!

爱因斯坦用升降机的假想实验来说明这一点:设想有一个封闭的升降机,那么,其中的观察者对于如下两种情况是无法判断的:一是升降机静止在重力场中,二是升降机在无重力空间中以加速度 g(量值与重力加速度相等)上升。在这两种情况下,他测得的自由下落物体的加速度都是 g,表明物体在重力场中的运动等效于物体在非惯性系中的运动,即引力场与加速度场是等效的,万有引力与惯性力是等效的,它们是无法区分的。当然,由于现实空间中各点的引力作用随高度而变,引力场与惯性力场只是在局部的小区域内等效。

由此,爱因斯坦提出了作为广义相对论基础的两个新的基本假设:

(1)等效原理:引力场与加速运动的参考系完全等价。或者说,在一个小体积范围内,万有引力和某一加速系统中的惯性力相互等效。

(2)广义相对性原理:在任何参考系中,物理规律都是相同的。或者说,自然定律在任何参考系中都可以表示为相同的数学形式。

等效原理表明,要把万有引力的效应同非匀速运动(如升降机的加速运动)的效应区分开来是不可能的。我们不能判定在升降机里所感受到的"引力"效应,是由于真实的引力场产生的还是由于升降机的加速运动引起的。爱因斯坦说,这是他一生中所获得的最快乐的思想。等效原理以"引力质量等于惯性质量"这一事实为基础,反之,承认了这一原理,引力质量与惯性质量的相等也就相当自然了。

广义相对性原理表明,物理定律必须对于无论以哪一种方式运动的参考系都成立,这就彻底抛弃了惯性系以及与之相关的绝对空间的概念,给予了所有的参考系平等的地位。

引力场对时空的影响:弯曲时空与引力几何化

等效原理对于理解引力的实质提供了全新的视角。按照等效原理,引力的本性就在于引力能在某种参照系("爱因斯坦升降机")中局部地被消除。虽然,全空间中实际的引力场是不均匀的,但在任何引力场中的任何一个时空点处,我们总能建立一个自由下落的局域参照系:首先,在这个参照系中,由于引力场被加速度场替代,就成了一个被局部实现的惯性系,而一个静止在恒星表面的参照系反倒不是惯性系了;其次,不同的时空点上参照系的加速度不同;第三,在局域参照系中,狭义相对论所确立的物理规律全部有效。

更为关键的是,基于上述两个基本假设,时空的性质、形象全变了,不再是我们所熟悉的欧几里得空间的样子了。作为一个例子,我们借助于在转动的参照物中的钟和量杆的行为,来说明时空的弯曲问题。这个例子中的道具很简单,但从

中你会感受到爱因斯坦令人惊奇的想象力。

我们在静止的实验室(静系)中安放一个绕固定轴高速旋转的圆盘(动系)。静系中的观察者甲看到,动系中的每一点(轴上的原点除外)都有大小为 $r\omega^2$ 的向心加速度,这里的 r 为甲所确定的圆盘上的一点到圆心的距离,ω 为甲测量出的圆盘的转动角速度。显然,在甲看来,动系是一个非惯性系。然而,在静止于圆盘、与圆盘一起转动的观察者乙看来,他不知道自己在转动,但感觉告诉他,无论他走到圆盘的哪一个位置上,都有一种沿着半径朝外的力作用于他(对甲而言,这个力被称为惯性离心力),于是,动系中的观察者乙说,自己处在引力场中,引力场的场强沿着半径方向向外,大小等于 $r'\omega^2$,这个 ω 是甲告诉乙的。根据狭义相对论,量杆在杆的方向运动时会收缩,但在垂直于杆子的方向不收缩,所以,动系中的 r' 与静系中的 r 是相等的。但是,我们马上就会看到,动系中的钟与量杆都要发生改变,空间与时间的几何性质不再满足欧几里得几何学了。

设想有两个完全相同的钟,一个固定在圆盘的中心,另一个固定在半径 r' 另一端点处,它们相对于圆盘是静止的。静系中的观察者会看到,第一个钟没有速度,第二个钟有速度,所以第二个钟永远比放在圆心处的钟走得慢,这是动钟变慢效应。而且,第二个钟离圆心越远时速度越大,走得也就越慢。动系中处于圆心的观察者会看到什么呢?显然,第一个钟是正常的,但第二个钟呢?根据洛伦兹变换,一定是慢的。这会使他很惊慌,为什么会这样?唯一的解释是,第二个钟处于"引力场"中,"引力"的存在使钟变慢了!而且,半径越大,"引力场"越强,钟走得就越慢!

所以,等效原理使我们得到了一个很重要的结论:在一个不均匀的引力场中,没有统一的时间,一个钟走得快还是慢,要看这个钟所处的位置,即取决于引力场的强度,而后者又取决于物质的分布状况,从而使得时间取决于物质的分布状况。

我们再来看空间长度的情况。动系(即"引力场")中的观察者乙拿起一把尺子(其长度远比圆盘半径小)进行长度测量,先测量一点的半径 r',与静系中的观察者甲测得的 r 值比较,发现二者一致,说明二人用的都是标准尺。可当乙用这把尺子去量直径为 $D(=2r'=2r)$ 的圆周长度时,怪事发生了:甲突然发现乙的尺子缩短了,但他马上想到这是洛伦兹收缩引起的(此时,尺子沿圆周切线方向运动)。于是,甲看到乙测得的圆周长度 s 将是一个较大的数,结果导致 $\frac{s}{D}>\pi$。

这是一个奇怪的结果:正常情况下,在欧几里得几何学中,$\frac{s}{D}$ 严格等于 π。现在,在"引力场"中,欧氏几何学的命题不能严格成立了,空间显示了非欧几何的性

质，即不再是平直的空间了，而是弯曲的空间。在这样的空间中，原来的直线失去了意义，两点之间的最短距离要用所谓“短程线”（或称为“测地线”）来确定，而粒子的运动则沿着“测地线”运行。

总之，在广义相对论中，“引力”是与弯曲时空等价的概念；反之，万有引力可以看成是时空弯曲的表现，或者说，引力是一种几何效应。

这样一来，引力成了一个多余的概念，它被归结为时空性质——加速度场，引力场源即物体（比如恒星或地球）不是在产生引力场，而是规定了时空的性质！由于加速度本质上是时空点的曲率，引力的力场被时空连续区的曲率代替了。但是，这个时空连续区由于受到物体及其运动的影响而不具有欧几里得空间的平直性质，而是一种非欧几里得空间。这样，引力现象受到由物质及其运动决定的非欧几里得的时空连续区的几何性质制约，这就建立了时空与物质及其运动（即质量、能量及动量）的联系。以前，狭义相对论认为时间、空间是一个整体（四维时空），能量、动量是一个整体（四维动量），但没有指出时间-空间与能量-动量之间的关系。现在，广义相对论进一步指出了这一关系，认为物质及其运动的存在（也就是能量-动量的存在），会使四维时空发生弯曲！万有引力并不是真正的力，而是时空弯曲的表现！如果物质消失了，时空就回到了欧几里得的平直状态。

1913 年，爱因斯坦与他的大学同学、数学家格罗斯曼合作，联名发表了《广义相对论纲要和引力论》，系统地论述了广义相对论的物理原理和数学方法。他们引入了新的数学知识，把平直空间的数学推广到了弯曲空间，并指出，人们所认为的引力其实只是“时空是弯曲的”这个事实的表现。

1915 年，爱因斯坦得到了广义相对论中最关键的规律——引力场方程，它的建立标志着广义相对论理论的基本完成。这使他非常欣喜，他写信给物理学家索末菲说，“这是我一生中最紧张、最激动，当然也是收获最大的时期之一。”

简单地说，爱因斯坦的引力场方程表达了这样一个事实：

时空曲率＝能量动量

引力场方程同时满足等效原理和广义相对性原理，它表明，时空的弯曲性质取决于引力源的物质分布和运动。这使它在认识时空的本性方面远远超越了狭义相对论：在狭义相对论中，各种力场被安放在四维的空间-时间框架中，时空的性质被预先设定为服从欧几里得几何，场的存在并不影响空间的平直性质；但在广义相对论中，引力场直接与时空的性质发生联系，时空的几何变成了非欧几里得的黎曼几何。尤其重要的是，作为一种引力理论，广义相对论与过去的牛顿引力理论本质上的不同在于，场的观念取代了超距作用的观念。

著名相对论专家、黑洞概念的提出者、美国物理学家惠勒曾经这样形象地解

释爱因斯坦的广义相对论:“物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动。”此外,人们喜欢用在一张巨大而平直的布上放置一个很重的大球后布的弯曲来说明物质与时空的关系,而用另一个小球在布上的运动不再是直线运动来说明引力的本质源于空间的弯曲。

总之,物质的存在改变了物理时空的平直性质,使空间、时间弯曲了,而时空的弯曲程度则反映了引力作用的强弱。这样,广义相对论最终实现了时间、空间和物质的统一。

惊天动地的预言:广义相对论的三大验证

爱因斯坦在建立广义相对论之初,就提出了三大预言,并很快得到了实验验证:引力红移、水星近日点进动、光线偏折。后来,又增加了雷达回波的时间延迟实验和引力波的观测实验等多种途径。

1. 引力红移

广义相对论的一个重大预言是引力红移,即在强引力场中的光谱应该向红端移动。原因是,如前所述,在强引力场中,时钟变慢了——这意味着,在强引力场中,一切物理过程都变慢了,比如,光源所发出来的光的频率变小了,波长变大了,反映在光谱上,就是向红端移动了。通过对宇宙中遥远的致密天体发出的光与地球上相应原子发出的光进行比较,可以检验红移量与相对论的预言是否一致。20 世纪 20 年代,天文学家们在天文观测中证实了这一点。到 20 世纪 60 年代初,人们在地球的引力场中利用伽马射线的无反冲共振吸收效应(称为“穆斯堡尔效应”),测量了光垂直传播 22.5 m 所产生的红移,结果与广义相对论的预言是一致的。

2. 水星近日点的进动

根据万有引力定律可以算出,行星的轨道是一个封闭的椭圆,与开普勒定律正好相符。但是,实际的天文观测表明,行星会在近日点发生进动(即每转一圈,轨道的长轴会转过一个小角度),使其轨道不封闭。这种进动以离太阳最近的水星最为显著,每百年移动 5 600 角秒。这个进动曾经被法国巴黎多科工艺学校的天文学家勒维耶用所谓的“火神星”的摄动来解释,但人们始终都没有发现“火神星”的存在。在考虑了各种因素之后,根据牛顿理论只能解释其中的 5 557 角秒,还剩下 43 角秒无法解释。爱因斯坦用太阳引力使空间弯曲的理论,对此做了很好的解释。按照广义相对论的计算结果,进动角度与用万有引力定律(平方反比定律)算出的结果偏差刚好是 43 角秒,而且不需要其他行星的影响,行星自己就

会进动。在爱因斯坦完成广义相对论之前,水星轨道的这个偏差值一直得不到合理的解释,当他算出这个偏差刚好是43角秒后,他就知道他找到了正确的引力场方程,欣喜之余,他马上写信给洛伦兹等众多好友,一起分享了他内心中抑制不住的快乐。

3. **光线偏折**

广义相对论的第三大预言是大质量天体使光线偏转。这要从1704年说起,当时牛顿提出,高速运动的粒子在经过大质量物体时因为受到巨大的引力而改变方向。他进而认为光是微小的粒子流,所以经过大质量的物体附近时就会发生弯曲。1804年,慕尼黑天文台的天文学家索德纳经过计算,预言光线经过太阳边缘时发生的偏折为0.875角秒。到1915年,爱因斯坦根据广义相对论提出,当可见光或其他波段的电磁波在穿过引力场时,会沿着弯曲空间中的测地线前进。因此,当一束光线经过大质量物体周围时,光线将偏向物体,其偏转角为:

$$\alpha=\frac{4GM}{c^2R}$$

其中,G为引力常量,M为天体质量,R为其半径,c为光速。据此,爱因斯坦计算出光线经过太阳附近时的偏折度为1.75角秒,正好比经典力学计算的结果大了一倍,显然,这是对广义相对论最明确、最严峻也是最关键的考验。

然而,天文观测的困难在于,一方面,这些数值太小,很难被观测到;另一方面,白天太阳太亮,根本看不到星光,晚上看到星光时太阳又落下了。所以,观测与验证只能等到出现日全食时进行了。这个机会,被英国天文学家爱丁顿(1882—1944,图3-60)抓住了。爱丁顿是造父变星的脉动理论的提出者,也是第一个提出恒星的能量来源于核聚变的人。1915年,在爱因斯坦给出经过太阳边缘的光线弯曲的最后结果时,正值第一次世界大战期间,英、德两国处于敌对之中,爱丁顿通过荷兰人了解到爱因斯坦的理论,激起了他对光线弯曲预言进行检验的兴趣。一战结束后,他说服了英国政府,获得了一大笔资助,组织了两个观测远征队,准备对即将到来的1919年5月29日的日全食进行观测。一队到了巴西北部的索布拉尔;另一队由爱丁顿带领,到了非洲西岸几内亚海湾的普林西比岛。但是,5月29日发生日全食时普林西比阴天,还下着雨,急坏了所有的观测队队

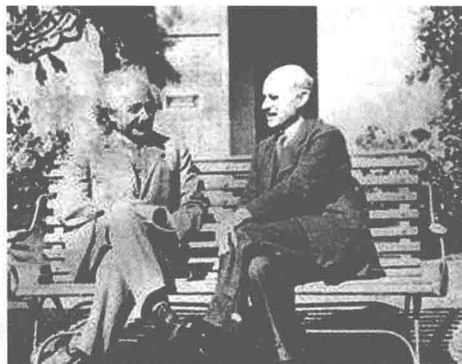


图3-60 爱因斯坦与爱丁顿在交谈

员。幸好，在日全食来临之时，太阳隐隐约约地露面了，雨停止之前，云层变薄，在经过了多次拍照的失败之后，他们得到了两张星像底片。为了防止回国途中出现意外，他们立即对其中的一张底片进行了仔细的研究，3 天后，计算工作完成时，爱丁顿就知道，爱因斯坦的理论经受住了考验。当年的 11 月，两支观测队的观测结果计算出来了：索布拉尔队的结果是(1.98″±0.12″)，普林西比队的结果是(1.61″±0.30″)。1919 年 11 月 6 日，他们宣布：光线按照爱因斯坦所预言的方式发生了偏折(图 3-61)。

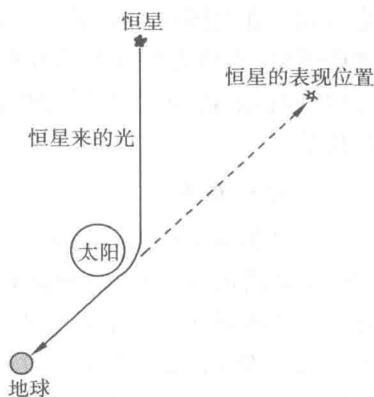


图 3-61　光线偏折的原理

消息传到德国时，德国物理学会正在开会，全场顿时掌声雷动，但爱因斯坦却无动于衷，叼着烟斗，面无表情。人们问他有何感想时，他平静地说："我从来都没有想过会是别的结果。"

从此，全世界为之振奋，欢呼雀跃的气氛旷日持久，爱因斯坦也迅速名扬天下，成为一个传奇人物，一个万人敬仰的英雄，所到之处，追捧者云集。1921 年，他首次到访英国时，下榻在负责接待他的霍尔丹勋爵在伦敦的住所里，霍尔丹的女儿在这位著名的客人来到她家时，激动得晕了过去，爱因斯坦带给人类的兴奋可见一斑。

顺便讲一个有趣的故事：一位记者去采访爱丁顿时说，听说世界上只有 3 个人懂得这套高深的理论，不知这 3 个人都是谁？爱丁顿低头沉思，很久没有回答。那个记者忍不住又问了一遍，爱丁顿说："我正在想谁是第 3 个人……"

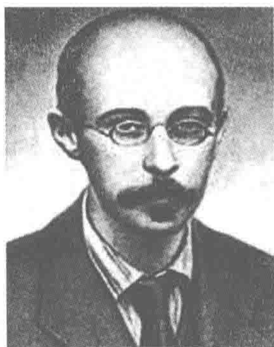
扩张的实验室：从天体物理到宇宙学

广义相对论建立了完善的引力理论，而引力理论主要涉及的是天体。所以，广义相对论建立之后，爱因斯坦马上把目光转向了宇宙学的研究，因为宇宙学问题是他那个时代唯一可以充分显示广义相对论作用的领域，毕竟，广义相对论的效应只是在强引力的时空中才显现出来。正如上述我们已经看到的，广义相对论的几大实验验证都涉及地球之外的天体甚至遥远的脉冲星，所以它的用武之地是巨型天体甚至整个宇宙。从天体物理到宇宙学，构成了广义相对论基本的实验室。而引力波物理、致密天体物理和黑洞物理等属于相对论天体物理学的分支学科都有了一定的进展，吸引了许多科学家进行研究。

1917 年，爱因斯坦发表了他关于宇宙学研究的第一篇论文《根据广义相对论

对宇宙学所做的考察》，在引力场方程中加入了宇宙项。爱因斯坦提出了静态宇宙模型，主张宇宙是一个体积有限但没有边界的静态弯曲封闭体。

1922年，年轻的苏联科学家弗里德曼(图3-62)基于爱因斯坦场方程提出了膨胀宇宙模型；1927年，比利时科学家勒梅特(图3-63)得到了类似的结果；1929年，美国天文学家哈勃公布了以他的名字命名的哈勃定律，可以看成是对该模型的有力支持。


图3-62 弗里德曼像

1948年，美籍物理学家伽莫夫(图3-64)等人提出了大爆炸宇宙模型，美国科学家彭齐亚斯和威耳孙在1965年发现的3 K宇宙背景辐射则证实了这一模型的正确性(彭齐亚斯和威耳孙因此分享了1978年诺贝尔物理学奖)。

1967年，美国物理学家约翰·惠勒(图3-65)提出"黑洞"这个名词，黑洞物理学正式诞生，掀起了广义相对论研究的一个新高潮。


图3-63 勒梅特像


图3-64 伽莫夫像


图3-65 惠勒像

1972年，詹姆斯·巴丁、布兰登·卡特和斯蒂芬·霍金(图3-66)提出等同于热力学定律的黑洞第四定律。

1972年，雅各·贝肯斯坦建议黑洞也有熵，就是事件视界的面积。

1974年，斯蒂芬·霍金将量子场论运用于黑洞时空，并证明黑洞会像黑体一样辐射出光谱而导致黑洞的蒸发。


图3-66 霍金与他的孩子

目前，奇点、黑洞、白洞、虫洞、时间旅行、宇宙弦问题……成为广义相对论的重要研究领域。

爱因斯坦对自己的相对论并不满意。他在晚年曾写道：

空间-时间未必能看作可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物体存在于空间中，而是这些物体具有空间广延性。这样看来，'关于一无所有的空间'的概念就失去了意义。

按照这一思路，当物质不存在的时候，时空也不应存在。但狭义相对论与广义相对论并未能做到这一点。在相对论中，物质不存在的时候，时空并未消失，而只是变得平坦。

"千年级"的天才

谁是人类历史上最伟大的科学家？谁具有人类最智慧的头脑？有一位高中物理老师每一次给高一新生讲到"为什么要学习物理学"时，都要提出这个问题。学生们的回答也几乎是惊人的一致，答案都指向了两个人：牛顿和爱因斯坦。他们都是物理学家！都是千年一遇的人物。在人类的科学历史上，还没有谁能够比伊萨克·牛顿和阿尔伯特·爱因斯坦更加光芒四射。

为什么要学习物理学？这就是最好的理由，仅仅这一个理由也就足够了。

关于牛顿(图 3-67)，有人评价说：他是怀着格物知理理想的数学物理大师，野心勃勃，生性多疑，但归根到底是一个好人。他的工作是划时代的，其情操也是划时代的。在历史上，他与莱布尼茨因为微积分的优先权而争执不下；与胡克因为万有引力的发现权而交恶；与惠更斯因为光的本性的理解不同而争论不休。这是一场真正的巨人之战，他们智力超群，可以说是天才中的天才。然而，牛顿具有一种由内而外的霸王气概，同时代的伟人在他面前，全然失去了颜色。我们只能由衷地感叹：到底是牛顿！



图 3-67　牛顿在制定宇宙的法则

1727 年，84 岁的牛顿离开了人世。葬礼上，为牛顿抬棺的是两位公爵、三位伯爵和一位大法官，他们都以为牛顿抬棺而终生为荣。法国哲学家和启蒙运动的领袖伏尔泰也参加了葬礼。伏尔泰描述说：

他是像一位深受臣民爱戴的国王一样被安葬的。在他之前，没有哪一位科学家享受如此殊荣。在他之后，如此厚葬的也将是屈指可数。

他的遗体被安葬在威斯敏斯特大教堂，一个历代国王加冕登基、举行婚礼庆

典的地方，也是英国王室的陵墓所在地。

牛顿去世后不久，诗人亚历山大·波普写下了如下动人的诗句：

> 大自然和它的规律隐藏在黑暗中，
>
> 上帝说，让牛顿降临人世吧！
>
> 于是，一切都大放光明。

关于爱因斯坦(图 3-68、图 3-69)，一位法国物理学家这样评价说："在我们这一时代的物理学家中，爱因斯坦将位于最前列。他现在是、将来也还是人类宇宙中最有光辉的巨星之一"，"按照我的看法，他也许比牛顿更伟大，因为他对于科学的贡献，更加深入地进入了人类思想基本要领的结构中。"

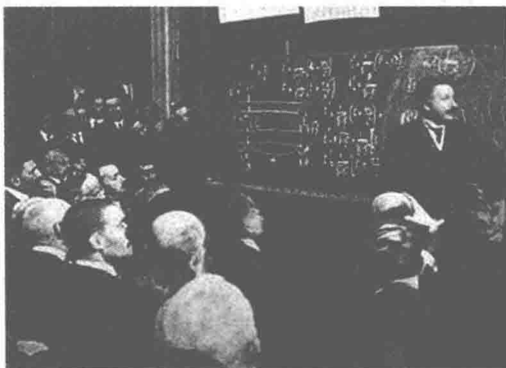


图 3-68　爱因斯坦在演讲



图 3-69　爱因斯坦在拉小提琴

德国物理学家、量子力学的几率解释的提出者、诺贝尔物理学奖获得者玻恩评价说："广义相对论是认识自然的人类思维的最伟大成就，是哲学的深奥、物理学的洞察力和数学的技巧的最惊人的结合。"

著名天体物理学家、宇宙学家、剑桥大学教授霍金的评价更为发人深省，他说：

> 政治是暂时的，而方程式是永恒的。广义相对论方程是最好的墓志铭和纪念碑，它们与宇宙一起永不腐朽。

在笔者的眼中，爱因斯坦之所以与众不同，是由于他有别于常人的精神气质，他有着思想家的独立精神，哲学家的洞察力，物理学家的想象力，数学家的严谨，艺术家的浪漫气质，宇宙学家的胸襟，修行者的淡定，宗教家的悲悯情怀，知识分子的社会责任心和革命者的英雄气概。

说到胸襟与气概，曹操虽然被称为"乱世之枭雄"，但他的英雄论却不得不令人佩服，曹操言道："夫英雄者，胸怀大志，腹有良谋，有包藏宇宙之机，吞吐天地之志者也。"纵观古今，谁人具有如此气概？笔者认为，唯爱因斯坦一人耳！传说，玻

恩见到爱因斯坦时，感觉在爱因斯坦身上有一种气贯宇宙的力量，他立刻被这种气势惊呆了，并哀叹自己之不济……

诗人歌德的诗句用在爱因斯坦身上再恰当不过了。歌德写道：

我们全都因他受益，

他的教诲惠及全球，

那专属他个人的东西，

早已传遍人间，

他如将陨的彗星，光华四射，

无尽的光芒与他永伴。

或许，爱因斯坦及其相对论在文化方面更能体现其历史意义和价值。我们可以通过一本极具启发性的哲学著作《思想的力量——哲学导论》的译后记中所引述的一段对话来体会这种意义：

当年雕塑家兼物理学家威耳孙负责监造坐落在芝加哥附近、占地巨大的粒子加速器。有一位参议员不断地质询，要求知道去探测质子对于国防有什么用途：

"有没有任何和这个加速器有关的东西，涉及国家安全？"

"没有，先生，我相信没有。"威耳孙回答。

"在这方面真的一点价值都没有？"

"它只能和我们人民之间的互敬、人民的尊严、我们对于文化的爱好有关。它与以下这些事物有关：我们是不是好的画家？好的雕塑家？伟大的诗人？我的意思是，在我们这个国家中，这些都是我们真正崇拜仰慕及尊重的东西，使我们爱国的东西。

"在这种意义下，这些新知识和尊荣、国家有关，可是它和防卫我们的国家没有直接的关系——除了能使这个国家变得值得去保卫。"

借用和引申这段对话，可以说，爱因斯坦之于人类的意义，或者说，爱因斯坦的历史意义，就在于他使人类变得值得热爱、值得去保卫！

然而，是什么造就了爱因斯坦？什么样的人格结构使他如此富有创造力？他的成长给予我们每一个人的启发性何在？阅读爱因斯坦，给予我们的教育启示是什么？或者说，成为爱因斯坦式的人需要的是什么？想必每一个人都会关心这样的问题。这就需要去探知他的人格结构，这是了解一个人最彻底、最有效的方式。为此，我们需要从追溯他的成长历史开始，然后考察他的理想人格，最后找到问题的答案。

爱因斯坦的成长之路

幼年时期的阿尔伯特·爱因斯坦(图 3-70)并没有任何迹象表明他会成为天才,他甚至直到 4 岁才会说话。在他 5 岁左右的一天,小阿尔伯特病了,为了让他的情绪好一点,父亲送了一个罗盘让他玩,他摆弄了很久,把罗盘转过来翻过去,可是不管怎么折腾,里面的那根针似乎很不听话,总是指着固定的方向,这使他非常惊讶,睁大眼睛盯着罗盘里面的那个红色的小指针:"这个针的周边什么也没有啊,到底是什么力量把指针推向指南北的呢?"一连几天,他都在玩这个罗盘,还缠着父亲和叔叔问个究竟。这份好奇,被小阿尔伯特深深地埋藏在了心里。



图 3-70　爱因斯坦与妹妹

小小的罗盘里面那根按照一定规律行动的磁针,唤起了他内在的强烈好奇心——探索事物原委的好奇心。他猜想,一定有什么东西深深地隐藏在事情的后面。这是激活爱因斯坦心智的最初动力。

接下来的重大助推力——准确地说,是爱因斯坦心智基础的奠基,来自于家庭的启蒙和爱因斯坦一家的善行所获得的意外回报。阿尔伯特的叔叔雅各布·爱因斯坦非常喜欢数学,经常用浅显通俗的语言把数学知识介绍给他。在叔叔的影响下,爱因斯坦获得了最初的科学和哲学启蒙。此外,爱因斯坦的家庭每周都会邀请来慕尼黑念书的穷学生吃饭,以这样的方式接济他们。其中有一对来自立陶宛的犹太兄弟麦克斯和伯纳德,他们都是学医科的,喜欢读书,而且兴趣广泛。他们来到爱因斯坦家之后,和不善言谈的小阿尔伯特成了好朋友。麦克斯可以说是爱因斯坦的"启蒙老师",带了很多通俗的自然科学普及读物给他看。在爱因斯坦 12 岁时,麦克斯给了他一本施皮尔克的平面几何教科书。晚年的爱因斯坦回忆起这本神圣的小书时说:"这本书里有许多断言,比如,三角形的三个高交于一点,它们本身虽然并不是显而易见的,但是可以很可靠地加以证明,以致任何怀疑似乎都不可能。这种明晰性和可靠性给我留下了一种难以形容的印象。"爱因斯坦还幸运地从一部卓越的通俗读物中知道了自然科学领域里的主要成果和方法,科普读物不但增进了爱因斯坦的知识,而且拨动了年轻人好奇的心弦,引起他对问题的深思。在这期间,爱因斯坦体验了证明毕达哥拉斯定理(中国人称之为勾股定理)的喜悦,使得他探索自然的好奇心变得更加强烈。于是,他自学了高等数

学，过了些日子，就连麦克斯和伯纳德也不再是他的对手了。不过他们也有办法，介绍爱因斯坦去读德国哲学大师康德的著作。于是，13 岁的爱因斯坦就开始读康德的《纯粹理性批判》，他的思考开始转向宇宙、哲学和知识中的逻辑。以这样的年纪，竟敢阅读成人都难于阅读的著作，大气磅礴的风范已初露端倪。

读书使爱因斯坦走上了自学的道路，也培养了他独立思考的习惯。可以说，爱因斯坦是一个自学成才的典型，但这也一度给他带来了诸多麻烦：独立思考的个性使他对一切骄横权威有着本能的强烈抵触情绪，这使他与死板生硬的教育方式格格不入。爱因斯坦的中学生活是在德国慕尼黑路易波尔德中学度过的，由于痴迷于数学而提前学完了高等数学。他在课堂上提出的数学问题常常令他的数学老师张口结舌和“心神不定”，于是爱因斯坦被认为是一个“生性孤僻、智力迟钝、不守纪律和想入非非”而弄坏了班级风气的学生，而那所学校的训导主任也对爱因斯坦的父亲说：“你的孩子将来做什么都没关系，但是将一事无成。”没有犯过任何过错的爱因斯坦被这所专制、死板的学校勒令退学了。这使得爱因斯坦极为沮丧，并深切地厌恶学校教育。

没有中学毕业文凭的爱因斯坦在父亲的建议下独自来到瑞士的苏黎世，投考那里的联邦工业大学。由于不善记忆，他的政治史、文学史成绩不佳，考试失败，但联邦工业大学的校长很欣赏他的数学才华，建议他到阿劳州立中学复读一年再来考试。遇到惜才的校长和进入阿劳中学，对爱因斯坦后来的成长产生了重大影响。阿劳州立中学当时推行的是瑞士教育家裴斯泰洛齐的民主和人道主义教育思想，这一教育思想的特点是学生要自我负责，老师的要务是向学生展示知识和科学的魅力，点燃学生好奇心的火花，激发起他们的求知欲望，以使他们的智力获得自由发展。这所学校的自由精神和那些毫不依赖外界权威的思想给他留下了终生不可磨灭的印象，培养了他的独立精神和创造精神。这时的爱因斯坦寄住在阿劳州立中学的教师温特勒先生家里。温特勒先生教授德语和历史，深谙教育心理学，而且学识渊博，他带着爱因斯坦在学校里四处散步参观，并让自己的一家人都和爱因斯坦交上了朋友。爱因斯坦从前对学校教育的不满和沮丧一扫而空，他逐渐变得乐观、自信，对知识的渴望也达到了前所未有的程度。也正是在这时，爱因斯坦立下了要献身科学的志向，并最终如愿考取了苏黎世联邦工业大学。

大学时代的爱因斯坦继续发挥他自幼养成并在阿劳中学得到强化的自主学习、独立思考的习惯，他读完了他那个时代最前沿和最重要的物理学著作，为他后来创立相对论奠定了牢固的知识基础和思想基础。

所以，可以说是阿劳州立中学造就了爱因斯坦。阿劳州立中学使爱因斯坦保持并发扬了他强烈的好奇心，重建了他的自信和意志力，使他拥有了强劲的探索

自然的动机；自我负责的教育思想和融洽的朋友关系使他的人格获得了再造；而他强烈的求知欲和学校的自由精神及不依赖权威的气氛促成了他在智力的发展方面突飞猛进，使他拥有了强大的心智能力。

1902年，爱因斯坦在等待专利局的录用时，为了维持生活，他不得不去做私人教师，可是不容易招到学生，收入也很少。他在报上登了一个广告："阿尔伯特·爱因斯坦，苏黎世工业大学毕业生，3个法郎讲1个小时物理课。"后来成了爱因斯坦挚友的索洛文看到这个广告后，便登门拜访。他们一见面就热烈地讨论起来，从理论物理到哲学，海阔天空地谈了好几个小时。第二天他们又见面了，继续前一天晚上的讨论。最后爱因斯坦说："坦白说吧，你不用听物理课了，讨论问题要更有趣得多。"他们还商量好一起阅读大师们的著作，并一起讨论问题。后来，爱因斯坦任家庭教师时认识的朋友哈比希特也参加了进来。就这样，3个年轻人每天下班后在一起吃晚饭，爱因斯坦特别重视一起晚餐的意义。当然，他们的食品极为简单，无非一点香肠、干酪、水果、蜂蜜和茶，但大家都很高兴，像古希腊大哲学家伊壁鸠鲁说的："欢乐的贫困是美好的"。他们开始读经典著作，非常热烈地讨论各种问题，有时激烈的争论要延续好几天。后来，爱因斯坦上班了。索洛文和哈比希特常常去爱因斯坦办公室的门口等着他下班出来，然后立刻继续前一天的争论。这样的讨论轮流在各人的家里进行，有时也去一个叫"奥林比亚"的小咖啡馆里进行。所以，他们戏称这是他们的"奥林比亚科学院"（图3-71）。爱因斯坦常常在这种"例会"上介绍他的研究进展。



图3-71 "奥林比亚科学院"的"院士们"

他们一起读大师们的哲学、数学和物理学的著作，以及一些文学名著，休息时爱因斯坦还常常拉小提琴助兴。在晴朗的夏夜，经过这种争论和学习之后，他们有时就到伯尔尼城南的胡尔金山迎接日出。有时爱因斯坦要躲开同伴，仰望庄严而神秘的星空。那个"假如我追随一条光线将会看到什么"的遐想又在叩击他的心灵，相对论正在孕育之中。

爱因斯坦以极大的热情参加这些活动，而且不缺席。3个年轻人热忱地渴望扩充和加深他们的知识，并在此过程中建立了真挚的友谊。这种坚韧不拔的学习精神和深厚的友谊一直保持到他们的晚年。1905年11月，由于索洛文和哈比希特相继离开伯尔尼，"奥林比亚科学院"停止了活动。

在爱因斯坦一生中最富有成就的这几年里，这些学习和讨论对他无疑是有很大帮助的。爱因斯坦到晚年还怀着孩子般的喜悦回忆起“奥林比亚科学院”，诙谐地说他是“奥林比亚科学院”的“通讯院士”。

爱因斯坦——理想人格的塑造

在爱因斯坦的心目中，有一个理想的人格类型在发挥着作用，这个理想的人格类型，在他所写的《悼念玛丽·居里》的悼文中，体现得非常充分。下面，让我们一起来欣赏这篇美丽的悼文：

在像居里夫人这样一位崇高人物结束她的一生的时候，我们不要仅仅满足于回忆她的工作成果对人类已经做出的贡献。第一流人物对于时代和历史进程的意义，在其道德品质方面，也许比单纯的才智成就方面还要大。即使是后者，它们取决于品格的程度，也远超过通常所认为的那样。

我幸运地同居里夫人有20年崇高而真挚的友谊。我对她的人格的伟大愈来愈感到钦佩。她的坚强，她的意志的纯洁，她的严于律己，她的客观，她的公正不阿的判断——所有这一切都难得地集中在一个人的身上。她在任何时候都意识到自己是社会的公仆，她的极端的谦虚，永远不给自满留下任何余地。由于社会的严酷和不平等，她的心情总是抑郁的。这就使得她具有那样严肃的外貌，很容易使那些不接近她的人发生误解——这是一种无法用任何艺术气质来解脱的少见的严肃性。一旦她认识到某一条道路是正确的，她就毫不妥协地并且极端顽强地坚持走下去。

她一生中最伟大的科学功绩——证明放射性元素的存在并把它们分离出来——不仅是靠着大胆的直觉，而且也靠着在难以想象的极端困难情况下工作的热忱和顽强，这样的困难，在实验科学的历史中是罕见的。

居里夫人的品德力量和热忱，哪怕只要有一小部分存在于欧洲的知识分子中间，欧洲就会面临一个光明的未来。

可以说，这篇悼文既是对居里夫人人格的颂扬与概括，也是他自己所追求的人格理想。居里夫人所拥有这些人格品质，在爱因斯坦身上同样具备。

现在，作为总结，我们可以设计一个“三维坐标”，借此来分析和概括爱因斯坦的人格“结构”。这“三维”就是动力性维度、社会性维度和心智维度。

爱因斯坦的人格品质在动力性维度上的表现是：强烈的好奇心，不自满的进取精神，坚持不懈的意志力，严于律己的自制力，毫不妥协的顽强精神，修行者的淡定，敢于打破传统的勇气。

爱因斯坦的人格品质在社会性维度上的表现是：对他人真挚、热忱、谦虚、悲

悯，对社会有极强的责任心，对邪恶势力刚正不阿。

爱因斯坦的人格品质在心智维度上的表现是：善于向大师学习，独立思考的习惯，坚定的独立精神，强烈的批判精神，异于常人的洞察力，勇敢的想象力和创造力，逻辑上的严谨。

一句话，爱因斯坦（图 3-72）拥有哲学家、物理学家、数学家“三合一”的头脑。



图 3-72　爱因斯坦与泡利

这是一张开放性的爱因斯坦人格框架与清单，尚有许多品质未被纳入，还有可被补充的余地等待读者的慧眼发掘。不过，从已经列出的这张清单中，我们可以大致领会到，成为一个天才或者要培养出一个天才，需要的是什么。显然，在所有这些品质中，如下三个方面尤为重要：强烈的好奇心和坚持不懈的意志力；真挚、热忱的做人态度；向大师学习、独立思考和善于发现联系。

这个顺序也可以被看成是造就天才的行动路线图，这既是爱因斯坦的人格密码，也是对他的人格分析所揭示出的成功者的全部秘密。



第四篇

奠基中国近代物理学的大师们



1582年，意大利传教士利玛窦到广东肇庆传播天主教，同时也介绍一些西方的科学知识。新知识的传播使中国近代物理学发生了质的变化，并且在中国物理学的发展产生了重要的启蒙作用。到19世纪中叶，为了实现中国科学和教育的近代化，这种科学知识的传播更加受到重视。特别是到20世纪初，中国开始大量派遣留学生，去学习近代科学知识，而近代物理学知识的学习是其中重要的部分。早期学成回国的物理学专业的留学生为中国的科学教育事业做出了重要贡献。在这里，只选择十余位物理学家加以介绍，借此来展示近现代中国的物理学发展。

X 射线学专家胡刚复


图 4-1 胡刚复像

胡刚复(1892—1966,图 4-1),小名龙倌,原名文生,又名光复,江苏省无锡人,出生于江苏省桃源县(现泗阳县)。他 5 岁上小学,因成绩优异而跳级,10 岁便进入南洋公学(中学)学习。但他年龄过小,比较调皮,上初一时曾骑楼梯扶手速滑下楼,因冲撞校长而被罚降回小学。几年后,胡刚复以优异成绩从中学毕业,并考入上海震旦大学学习。

1909 年,胡刚复到美国留学,入美国哈佛大学物理系。他爱好体育,成为学校足球队队员,并练就了好身体。1913 年大学毕业时获奖学金进入哈佛研究院,在杜安教授指导下从事镭提纯工作,并在医院从事癌症放射性治疗研究。1914 年获硕士学位后,进行 X 射线光谱研究,1918 年获哲学博士学位,旋即回国。

回国后,胡刚复认为,要救中国就必须让科学在中国大地上生根开花,所以胡刚复一心扑在培养学子的教学工作上。1918 年,他在南京高等师范学校(此校于 1920 年改建为国立东南大学,1928 年再改为国立中央大学,1949 年更名为南京大学)创建了中国最早的物理实验室。他认为,作为实验科学的物理学,必须有实验课方能培养出真正的物理学家。这也是胡刚复坚定不移的信念。1920 年,南京的东南大学和胡刚复兼职的上海大同大学已有供学生用的物理实验室。

1923 年 12 月 12 日晚,东南大学理化楼失火,实验仪器付之一炬。胡刚复于当天乘火车赶赴上海向大同大学借仪器,并立即乘车携回南京,保证了学生的实验课不被耽误。他刚到南京高等师范学校任教授时,全系只有他一个教授,讲课和指导实验全由他一人完成。他还在上海兼课,因此每周 3 天在南京,3 天在上海授课。他的学生中,有一大批为中国科学和科学教育做出重大贡献的科学家,如吴有训、恽子强、严济慈、吴学周、赵忠尧、柳大纲、施汝为、顾静徽和钱临照等。

1926 年,胡刚复受聘为厦门大学理学院院长,他聘著名的科学家来理学院工作,使理学院的工作步入正轨。1928 年,他在上海参与创办中国第一个物理研究所——中央研究院物理研究所,并任研究员。

1946 年,胡刚复被委派率学生前往英国学习雷达技术,为中国培养了第一批雷达技术人才。在英国期间,他每周都到剑桥大学听课,听微波原理和以前没有正规学过的量子力学、电动力学和统计力学等课程。二战后,由于英国冬季无取暖条件,他的伤寒病后遗症(耳朵失聪)更为加重,以致每次听课要坐在第一排才

勉强听见。1948年，他借道美国，考察了二战后美国的科学研究特别是核物理和高能物理的进展。1948年11月回到杭州。

1950年，胡刚复去唐山交通大学（今西南交通大学）和北洋大学（今天津大学）任教。1952年，他被聘为南开大学物理系教授。在北洋大学和南开大学期间，他讲授过光学、近代物理学和X射线金属学等多门课程。为了讲好不甚熟悉的金属学课程，他每周乘火车从天津来到北京，听金属物理学家讲授的金属学课程。

1966年2月19日，胡刚复于天津市总医院逝世，享年74岁。患病期间，他写了"一身傲骨"四个大字，并保存在书桌抽屉里，他去世之后被发现。这四个字是一位有骨气的爱国知识分子和中国科学教育先驱的真实写照。

为了纪念早期科学家对中国物理学的贡献，1987年3月，在中国物理学会第4届全国会员代表大会上通过了一个重要的决议，即设置物理学奖，共4个奖项，分别是胡刚复奖、饶毓泰奖、叶企孙奖和吴有训奖。这4位人物不仅是中国著名的物理学家，也是中国物理学会的创始人。其中，胡刚复奖奖励实验技术上有突出贡献的物理学工作者，饶毓泰奖奖励在光学、声学、原子和分子物理领域有突出贡献的物理学工作者，叶企孙奖奖励在凝聚态物理学领域有突出贡献的物理学工作者，吴有训奖奖励在原子核物理学领域有突出贡献的物理学工作者。

为人正直的饶毓泰

饶毓泰（1891—1968，图4-2），又名俭如，字树人，江西临川钟岭人。1911年，20岁的饶毓泰以优异成绩毕业于上海南洋公学（今上海交通大学前身）。1912年回到故乡，执教于江西省立第三师范学校。次年，考取江西省公费留学，赴美国芝加哥大学攻读物理学。1917年，获物理学硕士学位，并考入普林斯顿大学研究生院，师从著名物理学家康普顿教授。1922年，他从美国购置大量物理实验仪器并携带回国，在南开大学创办了物理系，担任教授兼系主任。



图4-2 饶毓泰像

1933年9月，饶毓泰受聘担任北京大学物理系教授和系主任，后兼任理学院院长。在北京大学，饶毓泰特别重视实验室建设和开展实验研究工作。他把北京大学理学院的一个小礼堂改为阶梯教室，建立了演示实验室，用以边讲课边演示，以期收到更好的教学效果。

1952年后，饶毓泰不再担任北京大学物理系的领导，但仍关心物理系的发展

特别是光学专业的建设工作。这时他已年逾花甲，且体弱多病，医生只允许他工作半天。他除指导研究生外，还先后开设了原子光谱学、光的电磁理论和气体导电基本过程等课程，为中青年教师和前来进修的教师提供了极大帮助。尤其令人感动的是，激光问世时，为了使国内科学界赶上这一新发展，饶毓泰讲授了“光的相干性理论”和“光磁双共振”等反映科学新进展的课程。这时他已年逾古稀，不仅讲课，还认真编写讲义，为后人留下了宝贵的资料。

饶毓泰为人正直，刚正不阿。“文化大革命”期间，许多知识分子受到迫害，学术研究成果也受到错误的批判，他就此严肃地指出，学术问题不能一概否定。由于受到不公正的待遇，饶毓泰先生于1968年10月16日含冤逝世。

饶毓泰十分关心年轻人，对他们多予鼓励和帮助。1927年，正在读大学二年级的吴大猷(后来成长为享誉世界的物理学家)对现代物理兴趣极浓，写了一篇短文，登在学校理科学会的小报上。饶毓泰看到非常高兴，重点培养他。

“卢沟桥事变”后，北京大学、清华大学和南开大学奉国民政府教育部令迁到长沙组成临时大学。饶毓泰偕同夫人历经艰难困苦才抵长沙，接着又随校到昆明，就任西南联合大学物理系主任。在云南的6年间，饶毓泰勤于教学科研，留下了许多“师生谊，世罕有”之佳话。饶毓泰身体不好，住在离校较远的乡间，交通不便，只能坐马车或步行到校上课或办公。为了扶植中国物理学界的后起之秀黄昆，他设法腾出编制，聘其为助教，但从未向别人谈起过，表现出高尚的品格。

饶毓泰基础光学奖于1991年饶毓泰先生100周年诞辰之际在北京大学创立，用以奖励在国内从事基础光学研究工作并做出突出成就且年龄不超过35周岁的青年科学工作者，旨在鼓励青年科研人员攀登科学高峰，献身中国光学事业。中国物理学会于1987年设立的饶毓泰奖是奖励在光学、声学、原子和分子物理领域有突出贡献的物理学工作者。

无私的叶企孙



图4-3　叶企孙像

叶企孙(1898—1977，图4-3)出生于上海的一个书香门第。父亲叶景沄博学多识，热心教育，曾任清华学校的国文教员。叶企孙于1907年入上海敬业学校读书，此前曾入私塾读书。1911年(13岁)考入清华学堂中等科，后因辛亥革命爆发而退学。1913年，叶企孙再度考入清华学校。1918年毕业于清华学校后赴美留学，先后就读于芝加哥大学和哈佛大学物理系，并于1923年获哈佛大学哲学博士学位。

叶企孙在哈佛大学时，在杜安教授指导下，与帕尔默合

作，利用X射线测定普朗克常量(h)的值。他们采取一系列措施以提高测量精度和准确度，获得精度很高的h值，即$(6.566\pm0.009)\times10^{-27}$尔格·秒(1尔格＝$10^{-7}$焦)。这篇论文于1921年4月在美国物理学会年会上宣读，并在《美国光学会月刊》和《全国科学院汇刊》上发表。“h”这一基本常量的精确测定是物理学界一件重要的实验研究工作，叶企孙对此做出了重要贡献。叶企孙的实验数据是当时的最佳数据，曾长期使用。

1921年叶企孙转向磁学研究，在高压物理学家布里奇曼的实验室中研究液体静压强对磁导率的影响。前人研究时压强仅达1 000 kg/cm²，但实验未获得成功。叶企孙用布里奇曼实验室中的设备，使压强可达12 000 kg/cm²，借此对铁、镍、钴的高压磁性进行了系统的研究，得到磁感应强度变化与压强、磁场强度之间的定量关系。叶企孙还对高压磁性进行理论分析，结论与实验结果定性相符。此项研究由叶企孙独立进行，是高压磁学的重要进展，属开创性工作，他因此项研究获得博士学位。这是20世纪20年代在物质铁磁性研究上的一项重要工作，受到了物理学界的重视。布里奇曼所著《高压物理学》(1931)中“压强对磁导率的影响”这一节的主要内容就是叶企孙的工作，后人在此基础上对铁镍合金进行了研究。

1924年，叶企孙回国，应东南大学之聘，任物理学副教授。1925年清华学校创立大学部，他接受清华之聘就任物理学副教授，次年升为教授。他创建了清华物理系，并出任系主任。叶企孙还在清华大学开展建筑声学的研究工作，可看作中国建筑声学研究的先驱。1929年，清华大学理学院成立，叶企孙出任院长，并被推选为学校的7位评议员(教授会议的最高议事机构)之一。此后，叶企孙一直是清华大学领导核心的人物之一，并几度以校务委员会主席和代校长名义主持校务。抗日战争爆发后，清华大学、北京大学和南开大学辗转至昆明，组建西南联合大学(简称“西南联大”或“联大”)，叶企孙在联大任教。1941年9月至1943年8月，他赴重庆任中央研究院总干事。叶企孙还是中国物理学会的创始人之一，并几度出任副理事长和理事长。1945年，叶企孙出任西南联大理学院院长，还曾主持西南联大的校务。

1948年春，北平解放。5月，叶企孙出任清华大学校务委员会主席。9月，他参加第一届中国人民政治协商会议，当选为全国政协委员。1955年，叶企孙当选中国科学院学部委员，并当选中科院数理化学部常委。

1952年10月，全国高校院系调整时，叶企孙随清华物理系一起调入北京大学。“文化大革命”中叶企孙曾受到冤枉而身陷囹圄，于1977年1月郁闷而终。

在科学教育和科学的组织管理上，除建立了清华大学物理系和理学院外，叶

企孙还建设了北京大学物理系磁学研究室。20 世纪 30 年代，他创建的清华物理学系和理学院，制定了“理论与实验并重，重质而不重量”的办学方针，聘请名教授来校讲学，培养出一批高质量的人才，对 20 世纪中国物理学教育和科学发展作出了巨大贡献。

晚年，叶企孙做科学史的研究，是中国科学院自然科学史研究所的创始人之一。他的一些科学史研究论文迄今还是研究科学史的重要文献。

1. 把学生培养成为科学家

在庆祝中华人民共和国成立 50 周年之际，党中央、国务院和中央军委决定，对当年为研制“两弹一星”做出突出贡献的 23 位科技专家予以表彰，并授予于敏、王大珩、王希季、朱光亚、孙家栋、任新民、吴自良、陈芳允、陈能宽、杨嘉墀、周光召、钱学森、屠守锷、黄纬禄、程开甲、彭桓武“两弹一星功勋奖章”，追授王淦昌、邓稼先、赵九章、姚桐斌、钱骥、钱三强、郭永怀“两弹一星功勋奖章”。1999 年 9 月 18 日，中共中央、国务院和中央军委在北京召开大会，隆重表彰研制“两弹一星”的功臣。熟悉这些科学家经历的人都不约而同地想起了叶企孙，因为这 23 位科学家中有 19 人是其学生，有 2 人是其学生的学生，还有 2 人的事业也与他有着密切的关系。

2. 无私的人格

1928 年，叶企孙请吴有训到物理系任教，把吴有训的工资定得比自己这个系主任的还高，以示尊重。后来他发现吴有训的工作能力很强，就于 1934 年推荐吴有训当物理系主任。1937 年，叶企孙又辞去理学院院长之职，推荐吴有训接任。叶企孙的辞职，既不是自己不行，也不是众人反对，更不是已到退休年龄，相反，他辞去系主任时年仅 38 岁。因此，他的辞职真正是一种礼贤下士的行为，这样的行动只能完全出于公心，是无私品格的体现。正是叶企孙荐贤任能，使吴有训脱颖而出，后来还当选中央大学(今南京大学)校长(1945—1947)和中国科学院副院长(1950—1977)。

正是这种无私的品格，保证了叶企孙能办好清华物理系。已故清华大学校长梅贻琦有句名言:“大学者，非有大楼之谓也，有大师之谓也。”这也是叶企孙的信条。他无论在当物理系系主任时，还是在担任理学院院长时，始终把聘任第一流学者到清华任教列为头等大事。从 1926 年到 1937 年，他先后聘来了熊庆来、吴有训、张子高、萨本栋、黄子卿、周培源、赵忠尧、任之恭等年轻有为的科学家到清华理学院任教。有了这批“名师”，“高徒”就不断从清华理学院涌现，1955 年中国科学院成立时，数理化学部半数以上的学部委员来自清华。

3. 鼓励学生上进

王淦昌一进清华，就迷上了化学。他在中学时没有接触过多少化学实验，一进实验室就显得异常兴奋。关于元素和化合物性质的各种实验，他都认真去做；他觉得化学很有意思，把化学元素周期表背得烂熟。可是，一年之后在选系的时候，王淦昌既没有考虑从小就喜欢的数学，也没有进化学系，而是选择了物理系。因为物理系的教授叶企孙很重视为学生的基础，亲自给学生讲普通物理课。有一次在课堂上，他提了一个问题；王淦昌很快给出了答案，叶先生很高兴。下课后，他把王淦昌找去了，了解王淦昌的学习情况，并对王淦昌说："以后有什么问题，可以随时来找我。"叶先生引人入胜的讲课及对王淦昌的关怀和鼓励，使王淦昌对实验物理有了特殊的兴趣，最终促使王淦昌在实验物理上有了很大的作为。

"康普顿最得的学生"吴有训

吴有训(1897—1977，图 4-4)，字正之，中国近代物理学奠基人，著名科学家和教育家。他生于江西高安荷岭石溪。1920 年，吴有训毕业于南京高等师范学校，1921 年底赴美，1922 年 1 月进入芝加哥大学。正好在这两年，康普顿以访问学者身份在芝加哥大学从事研究和教学。1923 年，康普顿正式成为芝加哥大学教授。几乎从一开始，吴有训就和康普顿一起进行 X 射线的实验。吴有训在康普顿的指导下，对"康普顿效应"进行了有力的论证。1926 年获博士学位，并于同年秋回国，先后在江西大学和中央大学任教。从 1928 年秋起，先后任清华大学教授、物理系主任和理学院院长(包括 1938 年以后在西南联合大学的 8 年)。1945 年 10 月任中央大学(今南京大学)校长。1948 年底任上海交通大学教授，后又任校务委员会主任和校长。1950 年夏，任中国科学院近代物理研究所所长，同年 12 月起任中国科学院副院长。吴有训还担任过中国物理学会理事长。1977 年 11 月 29 日，80 岁高龄的吴有训在家里接待了来访的同事和学生，晚 6 时许给秘书打了电话，布置成立中国科学院学术委员会事宜。就在这一天，他对家人说："需要做的工作太多了，可惜我已 80 岁了，若能年轻一点就好了。"遗憾的是，第二天他便因动脉瘤破裂导致大出血，在家中去世。



图 4-4 吴有训像

吴有训到晚年还很关心自然科学史的研究工作。1977 年 10 月，就在他逝世前一个月，他谈到关于如何评价玻尔和海森伯等物理学家，以及如何评价哥本哈

根学派的问题。他认为应当充分肯定这些物理学巨匠们的科学成就，对他们的哲学思想也应当加以研究分析，不要只是一味批判。吴有训还特别谈到了玻尔的人品，认为他的确是一位品格高尚的科学家，并且对中国人民怀有真挚的友情，在评价这样的科学家时，切忌片面和简单化。

吴有训很注意培养学生进行实验物理研究的才能。他在教学中注意到王淦昌对实验的特殊爱好和操作能力，非常喜欢这个勤于思考又好动手的学生。他自己是通过实验工作接受近代物理学的，也希望以同样的方式来培养王淦昌。1929年6月，王淦昌大学毕业，吴有训把他留下来当助教，并且给了他一个研究题目：清华园周围氡气的强度及每天的变化，目的是要研究北京附近气象因素对大气放射性的影响。王淦昌在吴有训的指导下，查阅了大量资料，然后进行实验。每天从早晨9点到11点，记录下当天的温度、大气压、风速、风向、云的性质与分布等。从1929年11月到1930年4月，一共6个月。这对青年科学家是一次考验，王淦昌采集到北京上空大气放射性与气象条件的大量相关数据，还写出了论文。

康普顿效应发现于1922年，这一发现一开始就受到人们的怀疑。有人认为实验证据不够充分，于是对康普顿的结论提出批评。为了取得更全面的实验证据，康普顿所在的芝加哥大学物理实验室开展了深入的研究，其中来自中国的研究生吴有训工作最有成效。他以高超的实验技术为康普顿效应的确认做出了重大贡献。吴有训对康普顿效应的研究，把康普顿效应的理论向前推进。后来，苏联学者鉴于吴有训对肯定康普顿效应的功绩，将康普顿效应改称为“康普顿-吴有训效应”。对此，吴有训公开表示不同意，表现了一位科学家求实的态度和谦虚的美德。

1926年，吴有训以“康普顿效应”为题通过了博士论文答辩。康普顿非常赞赏吴有训的才干，晚年曾对杨振宁说：吴有训是他一生中最得意的学生。他在著作中引用了吴有训所得到的实验结果，这些数据一直被各种著作和教科书引用，成了康普顿效应最有力的实验证据之一。

吴有训不仅是一位杰出的物理学家，而且是一位杰出的教育家和科学研究的组织者。1926年秋，吴有训任教于上海大同大学，后又辗转于南京的中央大学和北平的清华大学等校，前后长达二十余年，为中国培养了大批人才，而且他的教育实践也为后辈留下了许多可资借鉴的宝贵经验。吴有训在物理教学中，重视培养学生的实验技能，鼓励自学，培养学生的思考能力。吴有训强调教师不能脱离科学研究前沿，他还身体力行，边教书边从事研究工作，这就使教学有了丰富的新内容。

东南大学第一届唯一的毕业生——严济慈



图 4-5　严济慈像

严济慈(1900—1996,图 4-5),字慕光,著名物理学家和教育家。他生于浙江省东阳县下湖严村。1914 年,严济慈就读于东阳中学,1918 年以优异成绩毕业。同年,以浙江省第一名的成绩考入著名的南京高等师范学校。入学后初读商科,一年后转工科,再一年转到数理化部。1923 年夏,他以第一名的成绩毕业于南京高等师范学校数理化部,因已修满大学规定的学分同时获得东南大学物理系理学学士学位,成为东南大学第一届唯一的毕业生。大学期间曾自学法文,并编著教科书《初中算术》和《几何证题法》。1923 年赴法国留学,1925 年获巴黎大学数理硕士学位,1927 年获法国科学博士学位。他在压电晶体学、光谱学和地球物理学都取得了显著的成绩,是中国现代物理学研究工作的创始人之一,也是中国光学研究和光学仪器专业的奠基人之一。

从 1929 年起,严济慈在巴黎大学光学研究所和法国科学院电磁铁实验室从事了两年紧张的研究工作,发表了 7 篇论文。1930 年底,严济慈从巴黎取道西伯利亚回国,途经北平时,感到这里是一个适宜进行科学研究的地方,遂应北平研究院院长李石曾之邀,出任物理研究所所长。在物理所,严济慈为研究所的发展投入全部心血。他选聘年轻人才,筹建实验设备,选定研究课题,邀请外国著名科学家来所讲学。自 1932 年起,严济慈兼任镭学研究所所长,直到 1948 年。十多年中,他积极倡导和支持中国放射化学研究,在为中国培养优秀的放射化学家和核物理学家方面做出了积极贡献。抗战爆发前的短短 7 年里,严济慈就把物理所办成一个学术氛围浓厚、科研成果丰硕、人才辈出的学术机构。研究所主要"开展光谱学、感光材料、水晶压电效应、重力加速度和经纬度测量、物理探矿等方面的研究",在国内外学术刊物上发表了六十余篇论文;从 1932 年至 1937 年间,相继应严济慈之邀访华的有朗之万(1931—1932)、朗缪尔(1934)、狄拉克(1935)、阿达玛(1936)和玻尔(1937)等科学家和数学家。他们都曾到物理所参观、讲学和交流。为培养年轻人才,严济慈每年挑选两至三名大学毕业生,对他们认真指导,选定课题,严格要求,并亲自参与研制仪器和进行实验。当这些年轻人具备独立工作能力时,严济慈就大力举荐他们到国外的著名实验室去深造,后来他们都成为著名科学家。

1955 年,严济慈当选中国科学院学部委员,并历任中国科学院办公厅主任、应用物理所所长、东北分院院长、技术科学部主任、中国科学院副院长和中国科技

大学校长。

1. **开创中国的放射化学研究**

20世纪20年代，严济慈两次赴法期间，与居里夫人有过多次交往。1925年，在巴黎大学，他为完成博士论文，曾向居里夫人借用居里先生早年用过的石英晶体片；1929年，他在居里实验室帮助居里夫人安装调试过一架新购置的显微光度计，并用它进行研究，发表了有关论文。因此，当居里夫人得知严济慈将于1930年底回国时，就表示愿意送给他一些放射性氯化铅，以支持他在中国开展放射学研究工作。严济慈担任北平研究院物理研究所所长后，于1931年3月31日写给居里夫人一封信，就筹建放射学实验室和镭学研究所一事，向她请教购买标准含镭盐以及如何更好地开展放射学研究等问题。居里夫人很快给严济慈回信，给予了热心的指导，并对筹建中的镭学研究所致以良好的祝愿，希望它"旗开得胜，并逐步发展成为一个重要的镭学研究所"。

2. **科学家的社会责任**

"卢沟桥事变"时，严济慈正在巴黎出席国际文化合作会议，消息传来，他在大会上发言谴责日寇侵略中国和威胁轰炸古都北平的罪行。随后又经李石曾推荐，协助刚到巴黎的中共旅欧领导人吴玉章与法国物理学家朗之万教授联络，共同在巴黎开展抗日宣传。严济慈在回国途中应里昂天文台台长杜费教授宴请时接受《里昂进步报》记者采访，再次发表了抗日言论，致使他和家人都遭到日本特务的监视。他无法再回到北平，就从香港绕道去云南昆明考察，并决定将北平研究院物理研究所主要人员和设备从北平撤退至昆明。

3. **为打日本出力**

抗战期间，为适应战时需要，严济慈在昆明领导物理研究所全体人员，全力从事军需用品的研制和与国计民生有关的应用物理研究工作。在昆明远郊黑龙潭龙泉观的破庙和简易平房里，在条件十分艰苦和设备极端简陋的情况下，他亲自动手研磨镜片，测量焦距，认真装配，严格检验，带领全所员工先后制造出一千多具供无线电发报机用的石英振荡器、三百多套步兵用的测距镜和望远镜，供中国军队和驻印度英军使用；还制造出500台1 500倍显微镜、200架水平仪、50套缩微胶片放大器等，部分满足了野战和后方医院及科研教学的需要。在此期间，他训练培养了一批年轻的光学工人，为后来新中国第一个光学精密机械研究所的建立准备了条件。1943年11月，严济慈因"发明磨制晶体新法对国防科学颇有贡献"，经国防科学技术策进会推荐而受到国民政府奖励；1946年夏，严济慈被国民政府授予为纪念抗战胜利而颁发的三等景星勋章。

中国核物理鼻祖——赵忠尧

赵忠尧(1902—1998,图 4-6)是中国著名的实验物理学家,早期从事硬 γ 射线与物质相互作用的研究并取得重要成果。赵忠尧出生在浙江诸暨,1920 年考入南京高等师范学校,后在东南大学任教。1925 年夏,赵忠尧随叶企孙到清华大学,在物理实验室任职。1927 年,赵忠尧赴美国加州理工学院留学,师从诺贝尔物理学奖获得者密立根教授。密立根爱才但非常严厉。他最初给赵忠尧布置的博士论文题目是光学干涉的实验,但赵忠尧要密立根换一个有些难度的题目。几天后,密立根给出"硬 γ 射线通过物质时的吸收系数"的题目(这里的"硬"字是说明 γ 射线的频率较高,能量也较高)。赵忠尧还是不太满意,密立根有些不悦,赵忠尧就接受了这个题目,并表示要把它做好! 其实,他们都没有意识到,这已把赵忠尧推到一个重要发现的门口。



图 4-6　赵忠尧像

1929 年底,赵忠尧把研究结果交给了密立根。这个实验结果让密立根很吃惊,与他的预期不相符,可又找不出问题。但另一位教授向密立根表明,实验结果是可靠的。密立根终于将赵忠尧的论文寄送给美国的《国家科学院院刊》,并于 1930 年 5 月发表。当年,赵忠尧获得理学博士学位。

密立根看到赵忠尧取得如此重要的研究成果,心中好不得意。在赵忠尧进行博士论文答辩时,他当着其他教授"讥笑"起赵忠尧,说:"这个小伙子不知天高地厚,当初我让他研究这个问题,他还嫌太简单,说要'考虑考虑'呢!"后来,密立根在他 1946 年出版的专著中曾多处引述了赵忠尧关于正反物质湮灭的实验结果。

赵忠尧在实验中首次发现的是一种特殊辐射。赵忠尧测得这种特殊辐射的能量大约相当于一个电子的质量。这说明,当硬 γ 射线通过重金属铅时,会产生成对的正物质和反物质(实际上是正负电子对),而且二者迅速湮灭并生成光子,即产生新的 γ 射线。这是历史上第一次从实验中观察到正反物质的产生和湮灭现象。

赵忠尧是第一个观测到正反物质湮灭的人。这个发现足以使赵忠尧获得诺贝尔奖,当时瑞典皇家学会也曾考虑过授予他诺贝尔奖。不幸的是,当时有一位物理学家对赵忠尧的成果提出了疑问,影响了赵忠尧的成果被进一步确认。这说明,当时人们对于反物质的认识是很肤浅的。

1931 年回国后,赵忠尧任清华大学教授。在物理系,赵忠尧开设了中国首个

核物理课程，主持建立了中国第一个核物理实验室。他在极为简陋的条件下进行研究工作。他和同事的研究结果有的发表在《自然》杂志上，著名物理学家卢瑟福曾在赵忠尧的论文前加上按语，对他大加赞赏。抗战爆发后，赵忠尧先后到云南大学、西南联大和中央大学任教。在十余年的教学生涯中，赵忠尧与他的老师叶企孙一起，培养了一批后来为中国的原子能事业做出重要贡献的人才：王淦昌、彭桓武、钱三强、邓稼先、朱光亚、周光召、程开甲和唐孝威，诺贝尔物理学奖得主李政道和杨振宁也都曾经受业于赵忠尧。

1946年6月30日，美国在比基尼岛上试爆了一颗原子弹。此时，在一艘驱逐舰上，英国、法国、苏联和中国的代表应美国政府之邀正在观摩，赵忠尧是中国代表。赵忠尧认为，要在这个强权世界上生存，中国必须发展自己的核科学。观摩完毕，赵忠尧去自己的母校加州理工学院，到核物理实验室访问并进行研究工作。赵忠尧发现，核武器研制的核心技术是加速器，没有加速器就不可能揭开铀核反应的奥秘。密立根十分欣赏赵忠尧的才智，也敬佩赵忠尧的爱国心。为了便于赵忠尧熟悉情况，密立根聘他做自己的工作助手，还特意安排他多接触实验设备。赵忠尧很快就了解到加速器的知识，并认真学习有关加速器制造的技术。赵忠尧还请一家零件制作的工厂来帮助制作加速器的元器件。

在美国期间，赵忠尧尽可能节衣缩食，一日三餐多是开水、面包加咸菜，节省下来的钱都用来购置设备。1949年年底，赵忠尧准备回国，并带回加速器部件和核物理实验器材，但他的举动被美国联邦调查局注意到，他们到运输公司开箱检查，扣下了赵忠尧的部分器材。1950年8月29日，赵忠尧和一些留美学者一起登上了回国的客轮。赵忠尧的几十箱东西受到检查，并没有发现什么，但美军还是不放心，当轮船途经日本横滨时，将赵忠尧押进了美军在日本的巢鸭监狱。

赵忠尧被关押的消息披露后，在国际上引起了轩然大波，中国掀起了营救赵忠尧的浪潮，世界保卫和平委员会主席约里奥-居里呼吁全世界爱好和平的正义人士谴责美国政府的无理行径，美国政府只得将赵忠尧释放。1950年11月底，赵忠尧回到祖国。他将带回来的器材和零部件全部交给了中科院近代物理研究所，并建成了中国第一台70万电子伏特的质子静电加速器。1958年又主持研制成功250万电子伏特的质子静电加速器。这些加速器对中国的核事业具有举足轻重的作用。

“文化大革命”中，由于曾有留学美国的经历，赵忠尧被戴上“特务嫌疑”的帽子，关进了“牛棚”。1973年，高能物理研究所成立，赵忠尧才恢复工作。

1948年，赵忠尧当选为中央研究院院士，1950年后，他历任中国科学院近代物理研究所和原子能研究所研究员、中国科学院高能物理研究所研究员和副所

长、中国核学会副理事长。1955年当选为中国科学院学部委员。1958年，他负责筹建中国科学技术大学近代物理系并任系主任。他精心挑选师资，还亲自编写讲义并讲授“原子核反应”课程。

不会阿谀奉承的周培源

周培源(1902—1993，图4-7)，著名的物理学家和教育家。他出生于江苏省宜兴县的一个书香之家。1919年考入清华学校(今清华大学前身)中等科。学习期间，他发表了数学论文《三等分角法二则》。1924年，自清华学校高等科毕业，并被送到美国芝加哥大学数理系继续完成大学课程。1926年分别获学士和硕士学位。1927年，周培源入美国加利福尼亚理工学院，研究相对论，次年获理学博士学位，并获得“最优等毕业生”(Summacum Laude)称号。1928年秋，赴欧洲学习，分别在海森伯和泡利的指导下从事量子力学研究。同年回国，被聘为清华大学物理系教授，此后还在西南联大和长期在北京大学任教授。



图4-7　周培源在芝加哥大学(1920年)

周培源在学术上的成就主要体现在两个方面，即引力理论和湍流理论。1936—1937年，周培源在普林斯顿高等研究院从事理论物理的研究，参加了爱因斯坦亲自领导的广义相对论讨论班，从事相对论引力论和宇宙论的研究。

1937年，周培源回国不久，抗日战争爆发。周培源认为，科学家应为抗击日本帝国主义的侵略服务，并毅然转向流体力学方面的研究。1943—1946年，周培源再次赴美。他先在加州理工学院从事湍流理论研究，随后参加美国海军试验工作，从事鱼雷空投的研究。1947年回国后，相继担任清华大学教务长和校务委员会副主任。1951—1982年间任中国物理学会理事长和名誉理事长。1955年，当选为中国科学院学部委员。1957—1986年间，任中国力学学会副理事长、名誉理事长。1958—1986年间，先后任中国科学技术协会书记处书记、副主席、代主席、主席和名誉主席。1978—1981年间，任中国科学院副院长。

1952年，在北京大学领导创办了中国第一个力学专业——数学力学系力学专业，还领导建造了北京大学直径2.25 m的低速风洞。

周培源为人正直无私，刚直不阿，从不阿谀奉承，投机取巧。“文化大革命”期间，“中央文革小组”组长陈伯达为了抢做“科学革命的旗手”，提出要组织批判爱

因斯坦的相对论，要召开万人大会，还要求周培源参加批判大会。周培源当即表示："爱因斯坦的狭义相对论批不倒，爱因斯坦的广义相对论在学术上有争论"。正是在周培源等科学家的阻止下，批判大会未能召开，才使中国科学界避免了陷入"令人尴尬的"境地。

周培源从事高等教育工作六十多年，培养了一些重要的科学家，如著名的物理学家和力学家王竹溪、彭桓武、林家翘和胡宁等。为了纪念周培源对中国物理学发展的贡献，受周培源基金会委托，中国物理学会于1997年设立并代为评选"周培源物理奖"。

以身许国的王淦昌

王淦昌(1907—1998，图4-8)，中国科学院院士，中国原子核物理学、宇宙射线和粒子物理实验研究的主要奠基人和开拓者，在国际上享有很高的声誉。



图4-8 王淦昌像

王淦昌是江苏常熟人。他的父亲是中医，在王淦昌4岁时就去世了。王淦昌13岁时母亲也因肺病故去。外婆很疼爱他，供他上学。1920年，他到上海读中学。在学校，他最感兴趣的是数学，积极参加老师组织的数学小组。在老师的指导下，他在中学里就学完了大学一年级的微积分课程。

1925年，王淦昌考上了清华大学。1929年毕业后就赴德国留学，1930年秋入德国柏林大学学习，1934年获柏林大学博士学位后回国。1934—1949年，王淦昌先后在山东大学和浙江大学任教，他注重对学生的理论教育和实验训练，培养出李政道、叶笃正和程开甲等一批优秀的科学家。

1950年4月，王淦昌应钱三强的邀请，到中国科学院近代物理研究所任研究员。1951年被任命为副所长，领导宇宙线的研究工作。1953—1956年，他领导建立了中国第一个宇宙线实验站，很快取得了一批研究成果，引起了国外同行的注意，使中国宇宙线研究进入国际先进行列。

早在1941年，王淦昌提出了验证中微子存在的实验方案，并为实验所证实。1964年，王淦昌与苏联科学家巴索夫各自独立地提出了用激光打靶实现核聚变的科学设想，是世界上激光惯性约束核聚变理论和研究的创始人之一，使中国在这一领域的科研工作走在当时世界各国的前列。1984年，他又领导开辟了氟化氪准分子激光惯性约束聚变研究的新领域。

王淦昌参与了中国原子弹、氢弹原理和试验研究工作，是中国核武器研制技

术的主要奠基人之一。他所在的研制核武器的集体获得了国家科学技术进步特等奖。王淦昌曾任第二机械工业部(简称二机部,后改称核工业部,现中国核工业总公司)九院副院长、二机部副部长兼原子能研究所(现中国原子能科学研究院)所长、中国科学技术协会副主席和中国核学会理事长。

1. 像叶企孙那样教书

王淦昌在浙江大学当物理系主任的时候,新生入学,他都要亲自去欢迎他们,和他们亲切交谈。王淦昌对新生们说:"物理学是一门很美的科学,大至宇宙、小至基本粒子都是物理学研究的对象,要寻求其中的规律。这是十分有趣的学科,你们选择了一个很好的专业。"王淦昌也像他的老师叶企孙和吴有训一样,把一批批学生吸引到物理学领域之中。

2. 发现反西格马负超子

1956 年秋天,王淦昌(图 4-9)到苏联杜布纳联合原子核研究所担任高级研究员,后来还担任副所长,王淦昌亲自领导一个实验小组,开展高能实验物理的研究,目标是要找到反超子。1957 年,一台能量为 100 亿电子伏特的质子同步加速器就要建成了,王淦昌考虑到反超子的寿命很短,要用新型的探测器——气泡室作为主要探测器。王淦昌嘱咐组员们在观察气泡室拍摄到的照片时要仔细。1959 年 3 月 9 日,他的小组终于从 4 万张底片中找到了一个反超子事例。这是世界上首次发现的超子的反粒子——反西格马负超子,把人类对物质微观世界的认识向前推进了一大步。王淦昌小组的工作受到各国物理学家的赞扬。1982 年,王淦昌和他的同事一起荣获国家自然科学一等奖。



图 4-9　王淦昌与竺可桢交谈

3. 捐钱与"王淦昌物理奖"

1960 年底,王淦昌在杜布纳联合原子核研究所的任期满了,他就要回国了。一天,他特地来到中国驻苏联大使馆,把一个存折交给大使,说:"请你收下,转交给祖国人民吧!"这是他在联合所工作积存下来的,一共 14 万卢布。当王淦昌获得国家自然科学奖后,得到 3 000 元奖金,并把这笔钱全部捐赠给原子能所的子弟中学,作为奖学金。他说,这可为娃娃们的父母减轻一点负担,使他们为原子能

事业更好地工作。

1999 年 12 月，在王淦昌逝世后的周年纪念会上，王淦昌的家人捐出了 50 万元，用以奖励在粒子物理学和惯性约束热核聚变研究有突出贡献的科技工作者。这样，就出现了中国物理学会的第 5 项物理学奖——“王淦昌物理奖”，它与 1987 年设立的胡刚复奖、饶毓泰奖、叶企孙奖和吴有训奖并称为中国物理学会“五项物理奖”。

4. 王淦昌以身许国

1961 年 3 月，二机部部长刘杰向王淦昌转达党中央的决定，要求王淦昌到核武器研究所报到，参与核武器的研制工作。王淦昌没有多想，随即表示：“以身许国。”从此，他隐姓埋名，默默奋斗了 16 年。在核武器的研制工作中，王淦昌负责物理实验方面的领导工作。在青海的核武器研制基地，王淦昌坚持深入到车间、实验室和试验场地，常常和大家一起工作到深夜。他严格把关，保证了一次次试验顺利进行。

1964 年 10 月 16 日下午 3 时，茫茫戈壁滩上升起了一个巨大的火球，接着是轰隆隆的爆炸声，原子弹爆炸成功。1967 年 6 月 17 日，中国第一颗氢弹又爆炸成功。此后，王淦昌又成功领导了中国前 3 次地下核试验。由于王淦昌的重要贡献，人们称他为“核弹先驱”。

5. 王淦昌“上书”

王淦昌一直关注着世界核能开发的历程，认为利用核能（建核电站）是解决中国能源问题的重要途径之一。1978 年，他和一些核专家一起给国家领导人写信，建议发展核电技术。后来，王淦昌率团出国考察。他还给有关杂志写文章，广泛地宣传核电的知识。

受控核聚变技术将是人类解决能源问题的根本途径，惯性约束是一种实现聚变的方法。王淦昌向国务院写了一份建议书，建议进行强激光的研究。王淦昌还亲自带一个研究组，进行惯性约束核聚变的研究。

王淦昌非常关注高科技事业的发展。1986 年 3 月，他与王大珩、杨嘉墀和陈芳允一起提出了发展中国高技术的建议，在邓小平的亲自批示和积极支持下，国务院在听取专家意见的基础上，制订了中国高技术发展计划——“863 计划”。

6. 王淦昌质问巡捕

1925 年 6 月，“五卅惨案”之后王淦昌与同学们一道在上海南京路上游行，抗议日本帝国主义残杀中国人的暴行。游行队伍走到英租界，王淦昌被印度巡捕抓住。王淦昌理直气壮地问：“在我自己的国土上散发传单，你凭什么抓我？”巡捕指

出:“你自己的国土?可这是英租界!”王淦昌严词批驳他:“我的祖国受帝国主义欺凌,我要为祖国来抗争。若此事发生在你的国土上,你能抓自己同胞吗?”巡捕哑口无言,只好将他带到僻静处,悄悄地放了。临走,这位印度巡捕握住他的手说:“小兄弟,你说得对,我理解你!”

重视科学教育的吴大猷

吴大猷(1907—2000,图 4-10、图 4-11)是著名的物理学家和科学教育家,是享誉世界物理学界的科学家。吴大猷是广东高要人。1931 年,吴大猷获奖学金赴美留学,在美国密西根大学从事光谱学、原子物理学和原子核物理学的研究工作,1933 年获得博士学位。回国后,在北京大学和西南联大任教。1946 年,赴密西根大学和哥伦比亚大学工作。1948 年被选为中央研究院院士。1956 年,曾赴台为研究生班讲授经典力学、量子力学、流体力学和核子间的相互作用问题。1975 年,吴大猷将他历年教学讲稿整理成《理论物理》(共 7 册),包括《古典动力学》《量子论与原子结构》《电磁学》《狭义相对论及广义相对论》《热力学、气体运动论及统计物理学》和《量子力学》(两册)。1978 年退休后回到台湾。1983—1994 年出任台湾“中央研究院”院长。



图 4-10　吴大猷与李政道



图 4-11　吴大猷与杨振宁

吴大猷的研究工作多在原子和分子结构及光谱、核子散射、大气物理、统计物理和相对论的领域。吴大猷曾研究多种原子分子光谱,研究有机物苯及其衍生物,发现并证明了苯的同位素移动。他在中国最早进行了原子多重激发态的研究,较早计算了氦原子双激发态;提出原子碰撞模型和计算方法;研究了氯化乙烯的同分异构体的红外光谱和分子对称问题。

早在 20 世纪 70 年代中期,吴大猷开始关注物理学哲学和物理学史问题。吴大猷认为,物理学家从对物理学的历史和哲学更深刻、更具批判性的理解中,会有

助于更全面地了解物理学。他先后写出了《物理学的性质、简史和哲学》(1988年)和《物理学:它的发展和哲学》(1992年),还将关于物理学发展与哲学的演讲整理并出版了《现代物理学基础的物理本质和哲学本质》。

吴大猷是一位受人敬重的物理学家,他对科学教育方面也有独到见解,他曾负责修订台湾中学科学课程,重新编写了台湾中小学的科学教科书。他对于科学发展的最大贡献是培养了相当多的科技人才,李政道和杨振宁得知他们获诺贝尔物理学奖时,不约而同地向吴大猷老师报喜并致谢。吴大猷的研究生黄昆在固体物理学的发展上做出了卓越的贡献。此外,像朱光亚、马仕俊、郭永怀、马大猷和虞福春等,都曾从吴大猷的教育中受益。

“中国的居里夫妇”——钱三强、何泽慧

钱三强(1913—1992,图4-12),原名钱秉穹,著名的核物理学家。少年钱三强随父在北京生活,曾就读于孔德中学。1936年,钱三强毕业于清华大学,1937年赴法国留学,师从约里奥-居里夫妇(居里夫人的女儿和女婿,也被称为“小居里夫妇”)。1940年,钱三强获法国国家博士学位,1946年获法国科学院亨利-德巴微物理学奖金。钱三强曾任法国国家科学研究中心研究员和研究导师,并获法兰西荣誉军团军官勋章。1948年,钱三强回国后历任清华大学物理系教授、中国科学院近代物理研究所(后为原子能研究所)副所长和所长、中国科学院学术秘书处秘书长、二机部副部长、中国科学院副院长兼浙江大学校长,中国科协副主席和名誉主席,中国物理学会副理事长、理事长和中国核学会名誉理事长等。1955年,钱三强被选聘为中国科学院学部委员,1956年参加中国第一次制定十二年科学规划的工作。



图4-12　钱三强和何泽慧

早年从事原子核物理研究时,钱三强发现了重原子核“三分裂”和“四分裂”现象,并对此给出了合理解释,深化了对核裂变反应的认识。在创建中国原子能科学事业,组织原子弹和氢弹的研究工作,中国科学院的组建和发展,特别是建立和健全学术领导、培养科学技术人才、开展国际学术交流、组织和协调重大科研项目等方面,钱三强都做出了重要贡献。作为中国原子能事业的主要奠基人,钱三强被誉为“中国原子能科学之父”和“中国两弹之父”。他是一位杰出的科学家,与钱学森和钱伟长被周恩来总理合称为“三钱”。

何泽慧(1914—2011,图4-13),山西灵石两渡人,生于江苏苏州,中国实验物理学家和中国科学院院士。1936年,何泽慧毕业于清华大学物理系,1936—1940年在德国柏林高等工业大学研究弹道学,并获博士学位。



图4-13 何泽慧像

20世纪40年代,何泽慧在德国海德堡皇家学院核物理研究所研究正电子和负电子的碰撞,发现了正负电子能量几乎全部交换的弹性碰撞现象。在法国法兰西学院原子核化学实验室工作时,与钱三强等人合作发现了铀的“三分裂”现象,并首先发现了铀的“四分裂”现象。1948年回国。新中国成立后,历任中国科学院原子能研究所和高能物理研究所研究员、副所长。

20世纪50年代初期,何泽慧与别人合作研制成核乳胶探测器,使中国成为当时少数几个能生产核乳胶的国家之一。20世纪50年代后期,领导建立了中子物理和裂变物理实验室;完成了大量的核参数测量任务,并开展了基础学科的研究,从而培养了一批具有基础科学研究素质的人才。

20世纪70年代后,何泽慧主要从事空间科学方面的工作,发展了科学高空气球的研制;在西藏建立了高山宇宙线观察站;充分发挥和利用中国特有的有利条件(山高地广),花少量的经费,在高能天体物理、宇宙线物理和超高能核物理等领域,取得了一些重要的科研成果,推动了中国高能天体物理的研究工作。

因为发现了铀核“三分裂”现象,她被西方媒体称为“中国的居里夫人”。

何泽慧于2011年6月20日在北京协和医院逝世,享年97岁。

1. **钱三强**

(1)名字的由来

为培养钱三强,在他7岁时,父亲送他进入由蔡元培、李石曾和沈尹默等北京大学教授创办的子弟学校——孔德学校。孔德学校是一所开明的新式学校,由蔡元培任校长。孔德学校师资力量较强、阵容整齐,老师们的水平足以胜任高中教学工作。可以说,钱三强童年时代得到的教育环境是得天独厚的。

钱三强的兴趣广泛,刚进初中时,13岁的钱三强就成了班上“山猫”篮球队的队员,在比赛中,他的拼搏精神和集体意识得到了同学们的一致好评。一次,一个比较瘦弱、体质不如钱三强的同学给钱三强写信,信中自称“大弱”,而称当时还叫“秉穹”的他为“三强”。这封孩子们之间互称绰号的调皮信,恰巧被钱秉穹的父亲

钱玄同看见了。“你的同学为什么叫你‘三强’呀?”父亲风趣地问道。“他们叫我‘三强’,是因为我排行老三,喜欢运动,身体强壮。”钱秉穹认真地回答了父亲的询问。父亲一听,连声叫好。他认为,这个名字好,但不能光是身体强壮,“三强”可解释为立志争取德、智、体都进步。在父亲的肯定下,钱秉穹就更名为钱三强了。

(2)留学法国

1937 年 9 月,钱三强在严济慈的引荐下,来到巴黎大学镭学研究所居里实验室攻读博士学位。该实验室是居里夫人创建的,居里夫人逝世后,由锕的发现者德比爱纳教授任主任。但实际上是居里夫人的大女儿伊伦·约里奥-居里夫人主持。伊伦就是钱三强的导师。伊伦像她的母亲居里夫人一样,潜心于科学研究,作风严谨,品格高尚,待人谦和、热忱。在约里奥-居里夫人的指导下进行研究,的确是一个难得的好机会。为了使钱三强有更多的学习机会,约里奥-居里夫人又提议,让钱三强到约里奥主持的法兰西学院原子核化学研究所学习,并允许他一段时间在这里工作,一段时间到那里工作。这使钱三强受益终生。

(3)发现“三分裂”和“四分裂”

1939 年 1 月的一天,约里奥让钱三强看一张照片,原来,它是一张用云室拍下的铀受中子轰击后产生裂变的碎片照片,它是第一张直接显示裂变现象的照片,十分珍贵。不久,约里奥-居里夫人又邀请钱三强和她合作证明核裂变理论。在两位导师的指导下,钱三强很快完成了博士论文——《α 粒子与质子的碰撞》。

钱三强很幸运,能在两位世界第一流科学家的教诲下学习、工作,使他很快进入了科学研究的前沿,还使他深入到核科学研究的前沿。

1946 年春,钱三强和何泽慧经过反复实验,终于发现了铀核的“三分裂”和“四分裂”。这一发现不仅反映了铀核的特点,而且使人类能进一步探讨核裂变的普遍性。约里奥自豪地说:“这是第二次世界大战后,他的实验室第一个重要的工作。”

(4)报国心切

在法国 11 年的勤奋工作,钱三强活跃在核科学研究的前沿。在这样优越的条件下,钱三强和何泽慧却要回国。他们把自己要回国的打算告诉了约里奥-居里夫妇。听了学生的要求,约里奥说:“要是我,也会做出这样的决定。”约里奥-居里夫人也语重心长地说:“我俩经常讲,要为科学服务,科学要为人民服务,希望你把这两句话带回去吧!”导师的话,成为他们一生的座右铭。

1948 年 5 月,钱三强和何泽慧,抱着刚半岁的女儿,带着导师和同行的深情厚谊,离开巴黎回国。他们随身带着一份珍贵的信件,这就是导师给钱三强在法国学习与工作的鉴定。鉴定是这样写的:

> 钱先生表现出科研人员所具有的特殊素质,在我们共事期间,他的这些

素质又进一步得到加强。他已完成了大量的研究工作，其中有些是非常重要的。他心智敏慧，对科学既有满腔热忱，又有首创精神。我们可以毫不夸张地说，在我们实验室学习并在我们领导下工作的同一代科学家中，他是最优秀的。我们曾委托他领导几批研究人员，他用自己的才华出色地完成了这项困难的任务，并受他的法国和外国学生的爱戴。

我们的国家对于钱先生的才干业已承认，并先后赋予他重任，先是任命他为国家科学研究中心的研究员，接着又聘任他为研究导师。他同时也是法兰西科学奖的获得者。

钱先生还是一位优秀的组织者。他具备了研究组织工作的领导者所特有的精神、科学和技术素质。

2. 何泽慧

(1)脱颖而出

1932年，何泽慧从她外祖母创办的苏州振华女校高中毕业，随同学前往上海考大学。考试前，父亲开玩笑说："考上大学就去上，考不上就当丫环。"何泽慧随身带了两元钱，与几位女同学搭船来到上海，在一位同学家里搭铺过夜。在上海，她分别参加了浙江大学与清华大学的招生考试。她的第一志愿报的是浙大，第二志愿是清华。

没想到，报着"考不上就去做小保姆"念头的何泽慧却考了个"女状元"。她后来回忆："考浙江大学的人有八百多，我报考的是物理学系，他们取的只有我一个女生，你说我的运气好不好？清华大学人多而且特多，一共有近三千人，清华的希望小得不得了！"然而，就是她最不抱希望的清华，也被她考中了。清华当年总共录取28人，她是其中之一。在清华大学的学习任务格外繁重，最终只有10人顺利毕业。何泽慧又是这十人中的第一名。这十人中包括后来成为她丈夫的钱三强。

(2)一封信定终身

经过两年的通信，1945年，32岁的钱三强终于鼓起勇气，向远在德国的何泽慧发出了一封简短的求婚信："经过长期通信，我向你提出结婚的请求，如能同意，请回信，我将等你一同回国。"然而此时，盟军已经开始对德国柏林进行大规模的轰炸，寄出求婚信之后，钱三强整日焦虑不安，他担心自己被拒绝，更担心何泽慧在德国的安全。不久，他终于在不安中等到了何泽慧的回信："感谢你的爱情，我将对你永远忠诚。等我们见面后一同回国。"1946年春天，何泽慧来到巴黎，他们如期举行了婚礼。与钱三强结婚后，已在德国做过两年核物理研究的何泽慧顺利进入巴黎大学居里实验室，与钱三强成为同事。

(3)何泽慧的优秀品质

何泽慧满腔热情地培养扶植学生,甘当人梯。五十多年中,她与学生们在核物理方面完成了许多科研成果,而经她用心改定的论文上却从没有署过自己的名字。对于年轻人,她一方面充分发挥他们的主动性,十分呵护他们的首创精神,放手让他们到实践当中去闯;另一方面,又密切关注他们的发展和成长,热情鼓励他们从点滴进步中增强信心,耐心启发他们从自身教训中学习提高。在她的带动和影响下,年轻人迅速成长起来,许多成为中国原子核科学事业的骨干力量和带头人。

何泽慧个人生活极其简朴。她在任何场合都把自己放在普通人的地位上。平易近人,没有一点架子。她摒弃虚荣,在荣誉面前始终保持着冷静清醒的头脑。她坚持实事求是,绝不苟且附和,性格质朴直率。

何泽慧为人谦虚。1994年,科学出版社出版《中国现代科学家传记》时,她坚决不同意立传,故在此系列丛书第六集(最后一集)"物理学"部分中没有她的名字——她的传记出现在了书中最后。编者特意加了特别说明:"此篇传记虽早已约稿,但因何泽慧本人谦让不同意立传,后在本书编辑组一再要求和催促下,作者才着手撰写并于全书付印前交稿。因全书页码已定,不便插入相应学科,故补排在最后。特此说明。"

只为研究乐趣的彭桓武



图 4-14　彭桓武像

彭桓武(1915—2007,图 4-14),理论物理学家。彭桓武原籍湖北麻城,1915年10月6日生于吉林长春,1931年考取清华大学物理系,1937年6月清华大学物理系研究生肄业。翌年赴英国爱丁堡大学理论物理系,师从著名物理学家麦克斯·玻恩,从事固体物理和量子场论研究。1940年和1945年分获哲学博士和科学博士学位。1941年8月后,曾两度在薛定谔任所长的爱尔兰都柏林高等研究院理论物理研究所从事研究工作。1945年与玻恩共同获得英国爱丁堡皇家学会麦克杜加尔-布列兹班奖。1947年回国,先后担任过云南大学、清华大学、北京大学和中国科技大学教授,并参与创办中国科学院近代物理研究所。1948年被选为爱尔兰皇家科学院院士。1955年当选为中国科学院学部委员(院士)。历任中国科学院近代物理研究所研究员、副所长,二机部第九研究院副院长,中国科学院高能物理研究所副所长,中国科学院

理论物理研究所所长等职。

20 世纪 40 年代末，彭桓武回国，培养了中国第一批反应堆理论与反应堆计算人才；他是核潜艇动力方案的领导者；他领导和参加了原子弹设计方案的制定；他领导和参加了氢弹的原理设计和试验；他参加了中国第一次地下核试验的理论领导工作。钱三强多次感叹：彭桓武默默地做了许多重要工作，但很少有人知道。著名生物化学家邹承鲁说：彭桓武先生才是真正的大家。

从 20 世纪 50 年代中期开始，彭桓武参与和领导了中国原子能物理、原子弹和氢弹理论研究。他在中子物理、凝聚态物理和爆轰物理的领域取得了重要成果，对分子结构提出过新的处理方法，并为中国核事业培养了一批优秀人才。

为表彰其在原子能事业和理论物理领域做出的突出贡献，彭桓武院士被授予 1982 年度国家自然科学奖一等奖、1985 年度两项国家科技进步奖特等奖、1995 年度何梁何利基金科学与技术成就奖和 1999 年国家"两弹一星功勋奖章"。

为了表彰彭桓武院士在理论物理领域取得的诸多成就，以及他为推动中国科学研究事业做出的重大贡献，2006 年 6 月 13 日，国际天文学联合会小天体命名委员会决定将中国科学家发现的、国际永久编号为 48 798 的小行星正式命名为彭桓武星。

彭桓武院士九十多岁高龄时，甚至在他住院期间仍然在思考和研究当前理论物理、粒子物理和宇宙学最前沿的领域，包括如何解释暗物质和暗能量等一系列的现象。

1. 彭桓武早年学习经历

1915 年 10 月 6 日夜，彭桓武呱呱落地。由于是早产儿，疾病陪伴了彭桓武整个童年，时任长春县(今属长春市)县长的父亲，在他咿呀学语时就教他简单的加减。4 岁时，他已学会四则运算。此后，彭桓武读小学和私塾花了 7 年时间。彭桓武经常翻看父亲的书，养成了自学的习惯。1930 年，彭桓武来到北平求学，因勤奋好学，一年内连升三级。

1931 年 9 月，彭桓武主要通过自学考入清华大学物理系。上学期间，他得到吴有训、叶企孙、周培源的指导。在清华物理系，他与王竹溪、林家翘、杨振宁等一起被誉为"清华四杰"。周培源更是喜欢这个体弱却功课优异的少年大学生，亲自指导他的毕业论文《地球上单摆的摆动周期是多少?》。1935 年夏，彭桓武考上了周培源的研究生。1937 年"卢沟桥事变"后，他来不及完成毕业论文，就被迫南下云南大学任教。1938 年，23 岁的彭桓武考取中英庚款留学资格，来到爱丁堡大学，师从德国理论物理学家、量子力学的奠基人之一玻恩。彭桓武是玻恩的第一个中国学生。在玻恩的指导下，彭桓武于 1940 年和 1945 年分获爱丁堡大学哲学

博士和科学博士学位。玻恩和爱因斯坦有着三十多年的交谊。在给爱因斯坦的信中,玻恩数次提到这位得意门生。1941 年,经玻恩推荐,彭桓武前往爱尔兰都柏林高等研究所做博士后研究,在著名科学家埃尔温·薛定谔领导的理论物理所工作。

据《薛定谔传》记载,薛定谔在给爱因斯坦的一封信中这样描述彭桓武:简直不敢相信,这个年轻人学了那么多,知道那么多,理解得那么快。

1941 年 8 月至 1943 年 7 月,彭桓武和海特勒、哈密顿合作,发表了有关介子场的研究成果,对宇宙线理解进行较系统的解释,后被称为 HHP 理论。HHP 理论是以三位作者姓名的头一个字母命名,其主要工作出自彭桓武。在这个理论中已出现一个重要的方程[后来被称为戴森(Dyson)方程]。随着 HHP 理论名扬国际物理学界,彭桓武的名字也广为同行所知。当时身在法国的钱三强曾说,连我这个不搞理论的人都知道 HHP 理论,可见彭桓武他们这个工作在当时的名气。

1945 年,彭桓武与玻恩因为关于场的量子力学与统计力学的一系列探索性工作,共同获爱丁堡皇家学会的麦克杜加尔-布列兹班奖。1948 年,在薛定谔和海特勒的推荐下,彭桓武当选爱尔兰皇家科学院院士,时年 33 岁。当时,彭桓武已经回国,正执教于云南大学。直到 20 世纪 70 年代中美建交后,彭桓武收到爱尔兰皇家科学院的院刊时,才知道自己 30 年前就已经是它的会员了。

1947 年,彭桓武代表云南大学前往比利时参加"大学教授会议"。之后,绕道法国巴黎看望钱三强、何泽慧夫妇。钱三强是彭桓武在清华大学物理系的同学,两人在 1939 年相识,并从此开始了长达半个世纪的友谊。那时候,美国已经在日本投了原子弹,彭桓武与钱三强心照不宣:回祖国大干一场!当时的都柏林,找一个到中国的轮船座位十分困难。无奈之下,彭桓武写信请在英国海军部工作的一个科学家朋友布莱克特帮忙,在一条英国的运兵船上找了个舱位。

2. 回国不需要理由

1949 年,彭桓武回到北京,暂住在清华大学的老师叶企孙家,与先期到达这里的钱三强重逢。此后,两人共同筹建中国科学院近代物理研究所,发展原子能事业,培养科研人才。多年以后,有人问起彭桓武,当年已在英国学术界有了极高的声誉与地位,为何还要选择回国时,彭桓武说:回国是不需要理由的,不回国才需要理由。

1931 年,只有半年高中学历的彭桓武主要通过自学考入清华大学。在清华大学,彭桓武严格遵循着主修物理、选修化学、旁听数学的学习计划,生活紧张而有序。彭桓武的清华生活由于日寇的入侵被迫中断。60 年后,八十多岁的彭桓武写了一篇论文,当作自己的毕业论文,还了清华大学周培源导师的债。1940

年，彭桓武完成了自己在英国爱丁堡大学的博士论文，论文得到了导师玻恩教授的赞赏，并获得哲学博士学位。但是，彭桓武对自己的论文并不满意，他说，我的论文只做了一半。玻恩说，如果都做了，就不能只给你哲学博士，还要给你科学博士了。第二年8月，经玻恩推荐，彭桓武到爱尔兰都柏林高等研究所做博士后研究，在薛定谔领导下工作。彭桓武与玻恩告别时，玻恩说，薛定谔没有学生。到都柏林后，彭桓武才逐渐明白玻恩这句话的深层含义。原来，薛定谔思虑深沉严密，对一个问题在没想清楚前是不会跟别人说的，一旦想清楚后再说，便十分严谨和正确，因而无从激发学生的创造性。而玻恩则让学生尽量独立思考，多创造性地做研究工作。这也成为后来彭桓武的为师之道。

3. **读书的习惯**

在清华的第一年，彭桓武每周有三天第四节无课。他就利用这段时间进书库，挑选要借的书。每次总凑满三册，这是当时借书规定的上限。借的书大多与上的课无关。当时的借书期限一般是两个星期，少数需要精读的才续借一次。那一年里，16岁的彭桓武读了康德的《纯粹理性批判》和《实用理性批判》、罗素的散文集、怀特海的逻辑著作。第二年，他每天上午都要到图书馆的阅览室去，从靠墙的一个书柜中取出先秦诸子丛书，连续浏览。这时的彭桓武，已经在4年前读完了《史记》，两年半前浏览过达尔文的《物种起源》和汤姆孙《科学大纲》的中译本。这时他已十六七，正是世界观形成的关键时期，所以对诸子的观点不无思辨，有时晚上还在宿舍写下心得。在先秦诸子学说中，他比较认同荀子"天行有常，不为尧存，不为桀亡"的唯物观。后来，曾专门借《荀子》精读，并假设该书章节在流传中有位置错乱，为之试作更正。他还对"道心惟微，人心惟危。惟精惟一，允执厥中"这16个字做了科学认识论的理解。若干年后他才体会到这里面包含着中西文化的根本差异，而他在物理系时则更强调科学地认识物质世界。晚年，彭桓武一直保留着北京图书馆（即现在的国家图书馆）的图书证。

彭桓武雅好诗词，淡定情怀。英伦十年，未改他书生本色。

物理奇才黄昆

黄昆（1919—2005，图4-15），国际上著名的固体物理学家、半导体物理学家和中国半导体技术奠基人。祖籍浙江嘉兴，出生于北京。黄昆的父亲曾是中国银行高级职员，母亲毕业于北京女子师范大学，也



图4-15　黄昆像

在银行工作。

1941年秋，黄昆来到西南联大。从北京到昆明，黄昆路经青岛、上海、香港、桂林和贵州，路上整整花了两个多月。黄昆第一次见到系主任饶毓泰时，饶毓泰对他说，在这儿要好好钻研学问、认真做研究。吴大猷让他半做研究生，半做助教，这样他还可以得到一些收入。黄昆的教学任务只是每周带一次普通物理实验。

1944年，黄昆毕业于西南联合大学的北京大学理科研究所，获硕士学位，并考取留英公费生。当时，一位英国教授给西南联大捐赠了一大批在英国出版的科学书籍。黄昆对这批书很感兴趣，大多都翻阅过。黄昆特别注意到一位名叫莫特的英国科学家，他感到这位科学家的学识非常渊博。这样，黄昆到英国，就到布里斯托尔大学随莫特学习，并于1947年获得博士学位。

1947年5月中旬，黄昆到爱丁堡大学物理系与德国著名物理学家玻恩一起从事研究工作。玻恩是量子力学的创始人之一，也是晶体原子运动系统理论的开创者。第二次世界大战期间，玻恩就打算写一部关于晶格动力学的专著，因年事已高，一度搁置。玻恩发现黄昆熟悉量子力学且有深邃见解，便将写作《晶格动力学》的重任交给了黄昆，同时交给他一些旧手稿。黄昆花了4年时间研究固体物理学，在书中提出了一些新见解。没想到，黄昆的这些新见解在激光发现以后，一一被实验证实。玻恩在给爱因斯坦的信中说："书稿内容现在已经完全超越了我的理论"。由此，《晶格动力学》奠定了黄昆在固体物理学领域的权威地位。

黄昆在固体物理理论和半导体物理学的研究中取得多项成果，在20世纪40年代，他首次提出固体中杂质缺陷导致X光漫散射的理论，被誉为"黄（昆）散射"。20世纪50年代，黄昆与合作者首先提出"黄（昆）-佩卡尔理论"和"黄（昆）方程"。

1951年，黄昆回到北京大学任物理系教授，1955年，年仅36岁的黄昆就当选为中国科学院学部委员，是当时学部委员中最年轻的。1956年，黄昆参与创建了中国第一个半导体物理专业，为中国信息产业培养了第一批人才。1977年后，黄昆出任中国科学院半导体研究所所长。黄昆还担任过中国物理学会理事长（1987—1991）。黄昆在科学上的成就受到了学术界的高度评价，1980年他当选为瑞典皇家科学院外籍院士。1985年当选为第三世界科学院院士。获得1995年度何梁何利基金科学与技术成就奖。2001年，黄昆获得了该年度国家最高科学技术奖。

1. 潞河中学的高材生

黄昆在北京读小学时，除了学会加减乘除，似乎并没有什么特别之处。他在

小学最出色的一次表现，是在三年级北京史地课考试中得了第5名。他带回家的奖品是一份介绍北京城的油印品。为此，他能说出北京内城和外城的城门名。读中学时，黄昆一度暂住在伯父家中，伯父发现黄昆很空闲，就问他为何如此空闲。黄昆说，老师留的作业都已完成。伯父说，那可不行，要把课本上的题全做明白。自此，黄昆就按照伯父的要求来学习，因此他的数学一直学得很好。到通县（今通州区）潞河中学后，他下课就忙于自己做题，很少看书上的例题，这使他没有养成"照猫画虎"的习惯。在潞河中学，黄昆是优等生，学习总成绩始终居于全年级之首。1937年，黄昆被保送到燕京大学，并选定了物理学专业。

2. 黄昆的"机遇"

1945年8月，黄昆到达布里斯托尔大学，成为第二次世界大战结束后莫特招收的第一个博士生。莫特，当时还是一位很年轻的教授，但已是国际上著名的固体物理学家。黄昆到布里斯托尔大学做莫特教授的博士生，他把自己将来的研究方向选定为固体物理学。这是一个大有作为的研究领域。如果没有准备，机遇将擦肩而过；有了充分准备，机遇就会被抓住。黄昆在燕京大学自学过量子力学，在西南联大时得到了名师指点，加上良好的学术环境，黄昆在固体物理发展的黄金年代抓住了机遇，做出了重大贡献。

3. 治学风格

黄昆先后师从吴大猷、莫特和玻恩等大师，其中莫特对他的影响最大。他有选择地吸取了这三位大师的治学之道，形成了自己独特而鲜明的治学风格。他把一生的科研经历归结为两点，即学习知识和创造知识。科研的最终目的还是创造知识，为此，黄昆从自己的切身经历总结出："学习知识不是越多越好，越深越好，而是要服从于应用，要与自己驾驭知识的能力相匹配。""对于创造知识，就是要在科研工作中有所作为，真正做出点有价值的研究成果。为此，要做到三个'善于'，即要善于发现和提出问题，尤其是要提出在科学上有意义的问题；要善于提出模型或方法去解决问题，因为只提出问题而不去解决问题，所提问题就失去实际意义；还要善于做出最重要、最有意义的结论。"这两句话可作为我们的座右铭。



图4-16　谢希德像

科学女杰谢希德

谢希德（1921—2000，图4-16），著名物理学家，中国半导体物理学研究的开拓者之一。她出生于福建泉州，

父亲谢玉铭(1893—1986)也是一位著名的物理学家。1946 年,谢希德从厦门大学数理系毕业,1947 年赴美国史密斯学院留学,获硕士学位后转入麻省理工学院,专攻理论物理,1951 年获博士学位。1952 年,谢希德回国后到上海复旦大学物理系任教,先后主讲 8 门基础课和专业课。在她努力下,复旦大学于 1955 年开设了固体物理专业,致力于半导体物理的发展。

1956 年秋,为了实现国家十二年科学发展规划,5 所大学的部分师生汇集于北京大学物理系,共同创办半导体物理专业。谢希德到北大参加半导体专业的建设和教学工作,并任教研组副主任。她与黄昆合作撰写了《半导体物理学》(1958 年)。这是中国第一部半导体科学的著作。半导体班为中国培养一大批半导体骨干人才。

1958 年夏,复旦大学与中国科学院上海分院联合办技术物理研究所,谢希德任副所长,为上海半导体工业发展和基础研究创建了条件。由于实验技术人员非常缺乏,她建立了上海技术物理中专,培养实验员。

20 世纪 60 年代初,国际上硅平面工艺兴起,她和黄昆认识到,这将促进半导体技术的迅猛发展,他们联名建议开展固体能谱研究,并由北京大学、复旦大学和南京大学共同承担。1963 年至 1965 年,谢希德和助手开展了对硒化锌和锑化钢等的研究。1965 年冬,谢希德作为中国固体物理代表团团长,出席了英国物理学会固体物理学术会议。回国后,她开始开展固体能谱的研究。1966 年夏,在北京召开的暑期物理讨论会上,她做了能带计算成果的报告,与各国学者进行交流。1978 年 9 月,谢希德又拟订计划,组织系列的学术报告讨论会。1979 年 3 月,中国科学院和教育部委托复旦大学物理系和现代物理研究所举办的固体理论讨论班,来自 84 所高校和科研单位的一百七十多位代表参加了讨论班,谢希德主持并亲自做了几场学术报告。

谢希德曾当选中国物理学会副理事长(1978—1991)和中国科学院学部委员(院士)。20 世纪 80 年代,她获得了美国、英国、日本、加拿大和我国香港地区共 13 所大学的名誉博士学位。美国的《今日美国》记者曾称她为“中国的哈佛大学校长”。1986 年她被选为美国物理学会的名誉会员,1988 年又当选为第三世界科学院院士,1990 年被选为美国文理科学院外国院士。

谢希德也是一位杰出的教育家和社会活动家。在高教事业方面,除了当选上海复旦大学校长,谢希德还是上海市科协主席和上海浦东杉达大学校长。2007 年 6 月,中国物理学会设立“谢希德奖”,以奖励投身到物理学研究与教学的女物理学工作者。这个奖项对于女物理学工作者的研究热情和教学的积极性起到激励的作用。

结语——中国近代物理学的发展

近代科学的酝酿要追溯到15世纪中叶。新的科学的特征主要是，科学研究要分门别类地进行细节上的研究，不再满足于思辨上的解释或说教，也不再仅仅是在解决技术问题时进行一般性的说明。为此，科学人士要进行实验，借此去接近自然界，并力求建立更为系统和全面的理论体系。

1582年，意大利传教士利玛窦（1552—1610，图4-17）进入广东传教。他是一位“饱学之士”，以他的学识和所携带的自鸣钟、三棱镜和地图，在士大夫和王公贵族中获得了极高的声誉。利玛窦和来华传教士汤若望、邓玉函、南怀仁等人参与了介绍西学的工作，他们与中国士大夫一起合作，翻译了一些科学著作，如《几何原本》《浑盖通宪图说》《测量法义》和《同文算指》等，其中包含物理学知识较多的书籍有《远镜说》《远西奇器图说》《地震论》和《灵台仪象志》等。这些新知识引起了中国人的极大兴趣和广泛关注，这些著作在学术界产生了很好的影响。传教士的翻译活动为国人打开了可以窥看西方科技的窗口，而由于1582年科学知识的传入，国人将1582年视为中国近代科学的诞生之年。



图4-17 利玛窦与徐光启

到19世纪下半叶，为了效仿西方，并试图生产出“船坚炮利”的军事装备，介绍西方科技的翻译工作更加受到重视。以物理学为代表，中外人士合作翻译出版了《重学》《光论》《重学浅说》《谈天》《物理学提要》《声学》和《光学》等。物理学译著不但多，而且有了一定的系统性。其中有代表性的是英国翻译家傅兰雅（1839—1928，图4-18）译的力学书和电学书、美国翻译家丁韪良（1827—1916）编写的物理书。这些书可以使阅读者通过学习得到一些较为系统的和基本的物理学知识。



图4-18 傅兰雅像

自然科学知识除了具有实用价值之外，还具有重要的启蒙作用。这些科技书有助于提高国民的科技素质。作为有意识地进行启蒙工作的傅兰雅，还主持了《格致汇编》杂志的编辑工作，并参加了中外合办的格致书院。传教士们组建的益智书会还编印了大批的教科书，产生了良好的社会效益。

甲午战争后，翻译活动并未减弱，物理学译著的质量也有所提高，像X射线刚刚发现不久，中国人就已知晓。20世纪初，清政府推行新政，更加重视科学启蒙的工作，针对不同的社会阶层，编制了一些新式教科书和科普读物。

从17世纪到20世纪初的300年间，中外人士合作翻译的物理学译著有100种左右。利用这些书传播西方物理学知识，使中国人开始学习和研究物理学，并逐渐步入近代物理学的时代。

总的来说，西方物理学知识的传入，使中国近代物理学发生了质的变化，并且在中国物理学的发展产生了重要的推动作用。

中华民国时期，中国的科学技术得到较大的发展。近代教育制度和研究体制的逐渐建立，为科学技术的发展创造了较好的条件。就物理学而言，吴有训从实验上支持了康普顿的理论——康普顿效应，赵忠尧为正电子的发现做出了重要的贡献，支持了有关反粒子的预言，王淦昌提出利用原子K俘获方法探测中微子，张文裕发现由μ子替代电子形成的一种新型原子——μ原子，也称为“张(文裕)原子”。

抗日战争爆发后，1938年春成立西南联大。在中国人民抗战最艰难困苦的年代，培养出杨振宁、李政道、黄昆、张守廉、李荫远、黄授书、邓稼先、朱光亚等一大批杰出的物理学家。

西南联大物理系规模虽然不算大，但是人才济济，中国物理学界许多学术造诣很深的知名教授都在这里执教。当时清华有叶企孙、吴有训、周培源、赵忠尧、王竹溪、霍秉权；北大有饶毓泰、朱物华、吴大猷、郑华炽、马仕俊；南开有张文裕、许贞阳。西南联大的数学师资也为当时国内一时之选。清华有杨武之、郑洞荪、陈省身、华罗庚、许宝騄；北大有江泽涵；南开有姜立夫。在西南联大，物理系每年级只有一班，三四十人。

新中国成立之后，王淦昌的小组发现反西格马负超子，这是世界上首次发现荷电负超子。在粒子物理学研究上，为解释强子结构问题，朱洪元、张宗燧、戴元本和胡宁等人提出了“层子”理论。20世纪80年代，中国先后在核工业西南物理研究院建成托卡马克装置——“环流器1号”(1998年建成“环流器新1号”，2002

年又建成“环流器 2 号”)，在兰州建成重离子回旋加速器，在北京建成正负电子对撞机(图 4-19)，在合肥建成同步辐射光源和超导托卡马克。在核技术应用上，中国科学家在原子弹和氢弹研制成功之后又自行设计和建成了秦山核电站，并且攻克了高温气冷堆和快中子增殖堆等关键技术，研制成功“神光”系列巨型激光器。

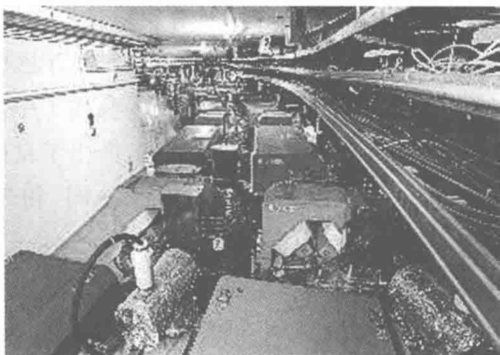


图 4-19　北京正负电子对撞机的双储存环

超导技术研究方面，在 20 世纪 80 年代的超导竞赛中，中国的科学家一直站在研究的前列。1998 年，中国又研制成功铋系高温超导线材。1998 年，美国发射的“阿尔法磁谱仪”，其中巨大的永磁铁就是中国制造的。21 世纪初，中国科学家又在铁磁超导材料做出贡献。原子级操纵技术和原子级加工居世界前列，纳米电子学超高密度信息存储研究和纳米“超级开关”材料的研究获得突破性进展。从 20 世纪 90 年代开始，中国科学技术大学的科研人员在量子物理学和量子信息学研究中取得了重大成就，保持着世界领先的水平。

我们有理由相信，21 世纪中国物理学家定能做出更大的贡献，而这些物理学家，相信就在我们读者群体中。

参考文献

1 闻人军.考工记译注[M].上海:上海古籍出版社,2008.
2 高亨.墨经校诠[M].北京:科学出版社,1958.
3 胡道静.梦溪笔谈校证[M].北京:中华书局,1959.
4 申先甲,张锡鑫,祁有龙.物理学史简编[M].济南:山东教育出版社,1985.
5 徐克明.中国古代物理学史讲义[M].太原:太原师专物理系编印,1988.
6 戴念祖,刘树勇.中国物理学史:古代卷[M].南宁:广西教育出版社,2006.
7 戴念祖,刘树勇.中国物理学史:近代卷[M].南宁:广西教育出版社,2006.
8 刘树勇,白欣.中国古代物理学史[M].北京:首都师范大学出版社,2011.

[General Information]
书名=大众物理学史
作者=刘树勇，白欣，周文臣等著
页数=249
SS号=13824187
DX号=
出版日期=2015.08
出版社=山东科学技术出版社